

発電電動機の同期始動

Synchronous Starting of Generator-motor Units

庄 山 悦 彦*
Etsuhiko Shōyama

要 旨

揚水発電所における発電電動機の始動方式として同期始動方式が国内においても採用されようとしている。この方式では始動時に系統側に与えるじょう乱がなく、始動負荷トルクがある程度大きくても始動できる利点があるため、大容量揚水発電所においては有利な場合がある。

この実用化にあたり、実機を用いて各種の試験を行ない検討した結果、始動用励磁容量の決定にあたっては、発電専用機の水車トルク特性を考慮して決定すべきであること、電動機の5%程度の小容量発電専用機でも始動初期の同期引き入れが可能なることを明らかにした。

1. 緒 言

揚水発電所の可逆ポンプ水車を駆動する発電電動機の始動方式には制動巻線始動、直結電動機始動、同期始動の三方式が用いられる。そのうち制動巻線始動は最も多く用いられている方法で、制動巻線に発生する電流によりトルクを発生するもので、この巻線の全発熱量は定格回転時の回転体のエネルギーと始動中の負荷損によるエネルギーの和である。前者は回転体の GD^2 に比例し、後者は摩擦および風損、場合によってはポンプ水車が水中で回るときの抵抗損に影響される。この熱は巻線自体およびその周囲の鉄心の温度を上昇せしめるので、巻線の体積を大きくして異常温度上昇を防ぐようにしている。このために制約を受け、この目安として単位慣性定数 H が用いられる。

$$H = \frac{GD^2 \cdot N^2}{730 \cdot \text{kVA}} \quad (\text{kW-s/kVA}) \quad (1)$$

ここに、 GD^2 : 回転体の慣性 (t-m^2)

N : 定格回転数 (rpm)

kVA: 定格容量 (kVA)

$H < 5$ ならば、鉄心長さが著しく大きくないかぎり制動巻線始動が可能である。

しかし、制動巻線始動では始動時系統に力率の悪い大電流が突入し、じょう乱を与える。

一方大容量機または送電系統から制約を受ける場合にはその始動方式として、直結電動機始動または同期始動方式が採られる。

直結電動機始動は発電電動機の上部に誘導電動機を直結する方法で機器建設費がかさむきらいはあるが、発電電動機には特別な制約は加えられない。アメリカ Cornwall 260 MW 機はこの一例で、国内では関西電力株式会社喜撰山発電所 240 MW 機がその例で現在日立製作所において設計中である。

揚水発電所内またはその付近の発電所に発電専用機がある場合には同期始動方式が用いられる場合がある。始動時に送電系統側に与えるじょう乱がなく、かつ制動巻線とは無関係に始動トルクをある程度大きくすることができるので始動時間を短縮する利点がある。東京電力株式会社水殿発電所においてはこの方式を採用している。

さきに 5,000 kVA 発電機と、5,000 kW 電動機を用いた試験結果の一部はすでに紹介されているが⁽¹⁾、さらに 5,000 kVA 発電機を用いて 110,000 kW の電動機を同期始動し、これらの問題点を検討したので、その結果について述べる。

2. 同期始動の概要

同期始動は専用の発電機と電動機とを停止の状態 で電機子回路を電氣的に接続し、かつ励磁を与えておき発電機に軸トルクを与えて回転させ、そのときに発生する発電機電動機間の同期化トルクにより同期化させ以後昇速して定格速度までもっていく方式である。

この同期始動現象は1~2%の速度に達する始動初期の問題と、定格速度までの区域にわたる始動途中と、同期並列の3段階に大別される。

始動初期すなわち電動機のまわり始めに電動機に与えられるトルク τ は次のような関数で表わされる。

$$\tau = F_1(E_2, I, \delta) \quad (1)$$

E_2 : 電動機磁束(励磁電圧に比例)

I : 電機子電流

δ : 内部相差角

一方電流 I は、いまの場合電動機が停止状態にあるとしているから

$$I = F_2(E_1, r, x, n_1) \quad (2)$$

E_1 : 発電機磁束(励磁電圧に比例)

r, x : 回路の抵抗, リアクタンス

n_1 : 発電機回転数

相差角 δ は

$$\delta = F_3(n_1, t) \quad (3)$$

t : 時間

また回転数 n_1 は、

$$n_1 = F_4(T_1, GD_1^2, t) \quad (4)$$

T_1 : 発電専用機に与えるトルク

GD_1^2 : 発電専用機の慣性

(1)~(4)式から

$$\tau = F(E_1, E_2, r, x, T_1, GD_1^2, t) \quad (5)$$

したがって電動機の静止摩擦トルクを T_{20} とすれば

$$\tau > T_{20} \quad (6)$$

で電動機はまわりはじめることになる。したがってこの時点では発電機回転数は n_1 電動機のそれは0であるので、電動機が発電機と同期するためには電動機の GD_2^2 を同期はずれを起こさぬように急にこの n_1 程度の回転数まで加速する必要がある。したがって n_1 はある回転数以内でなければならない。

このように同期始動初期の難易を決める要因としては

(i) 発電機(G)電動機(M)の慣性の大きさ (GD_1^2, GD_2^2)

(ii) G, M および起動母線などの電機子回路の全抵抗 (r)

(iii) G, M 電機子回路の全リアクタンス (x)

* 日立製作所日立工場

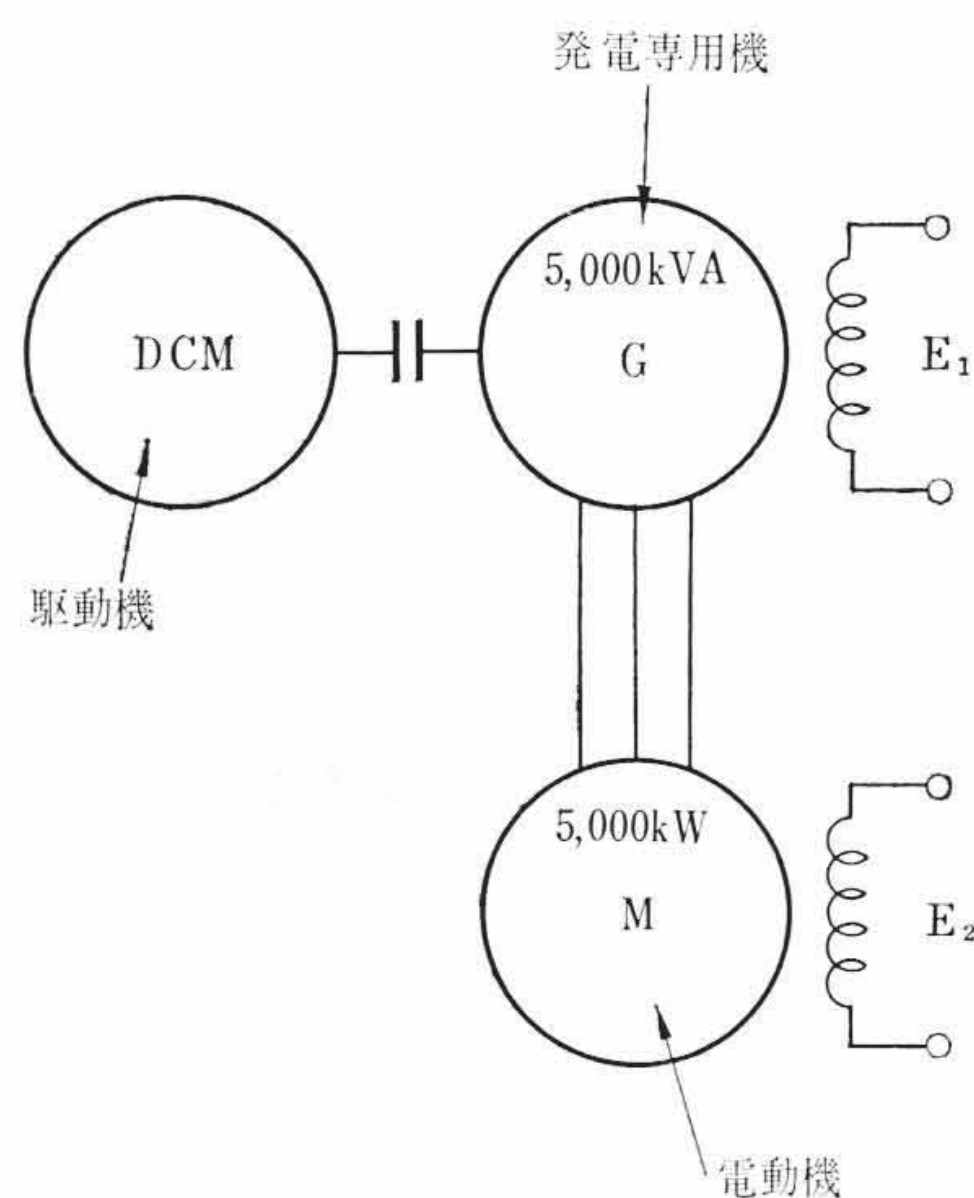


図1 試験回路

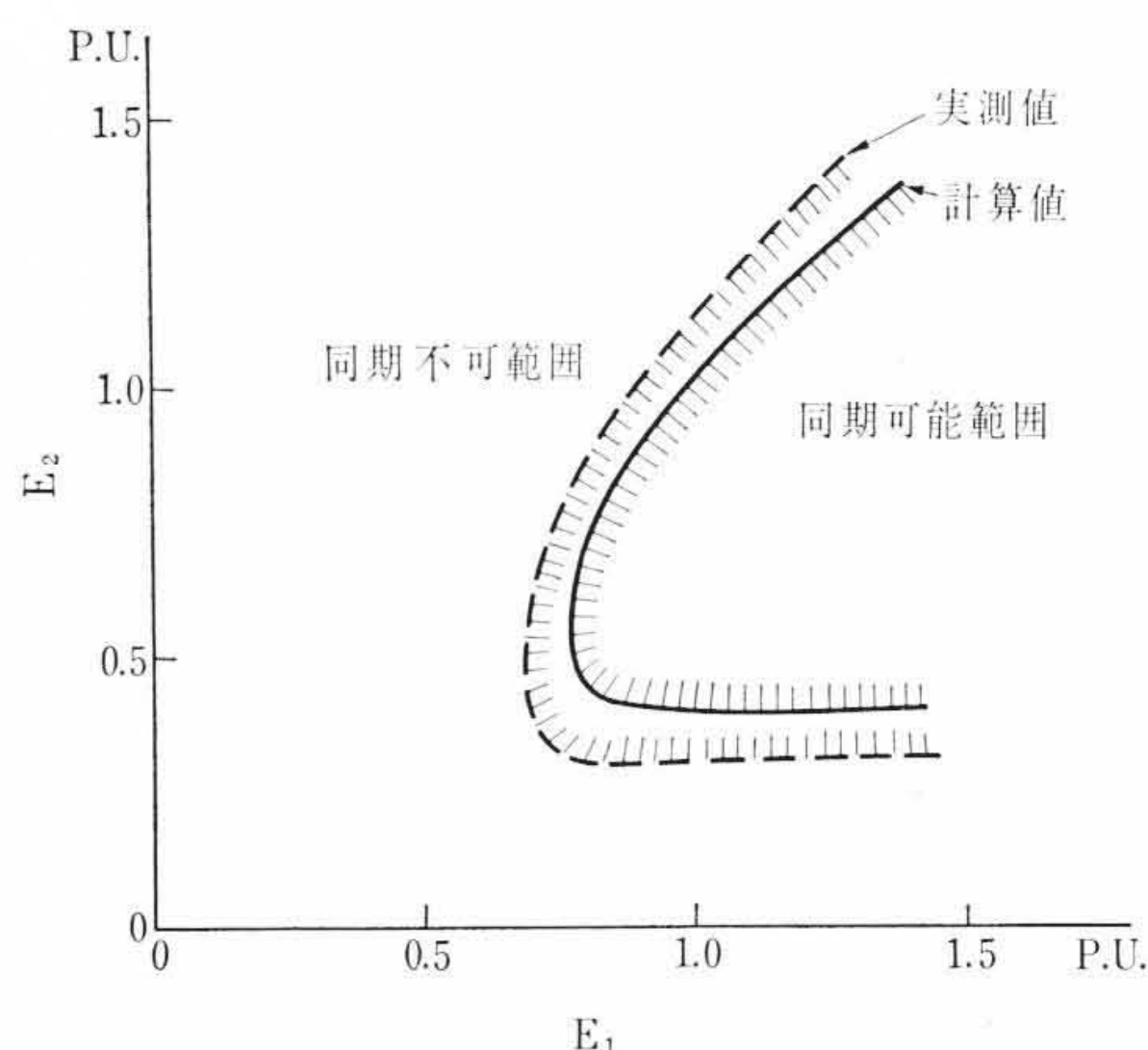
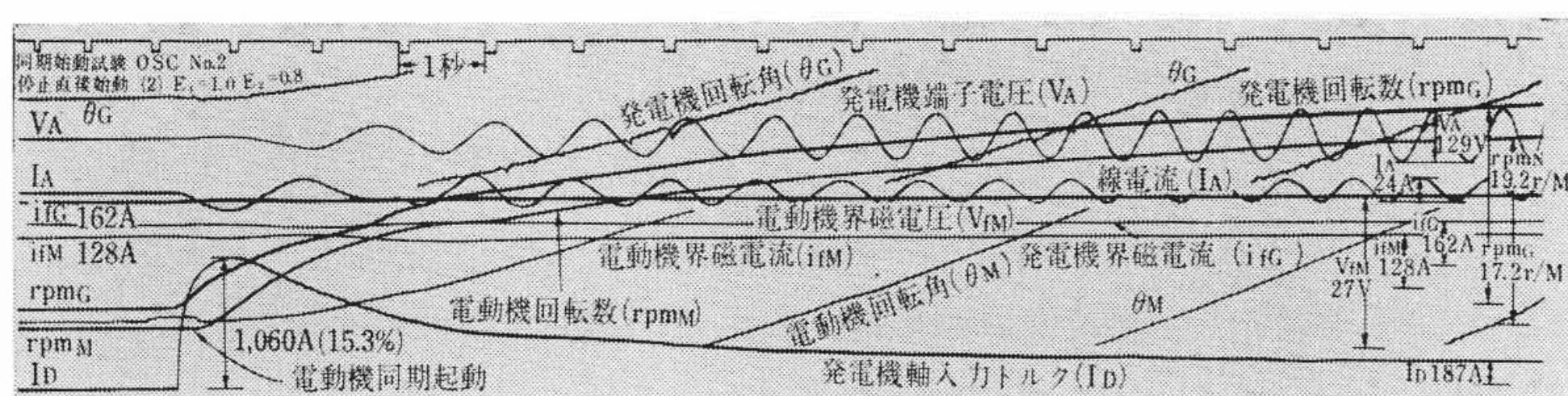
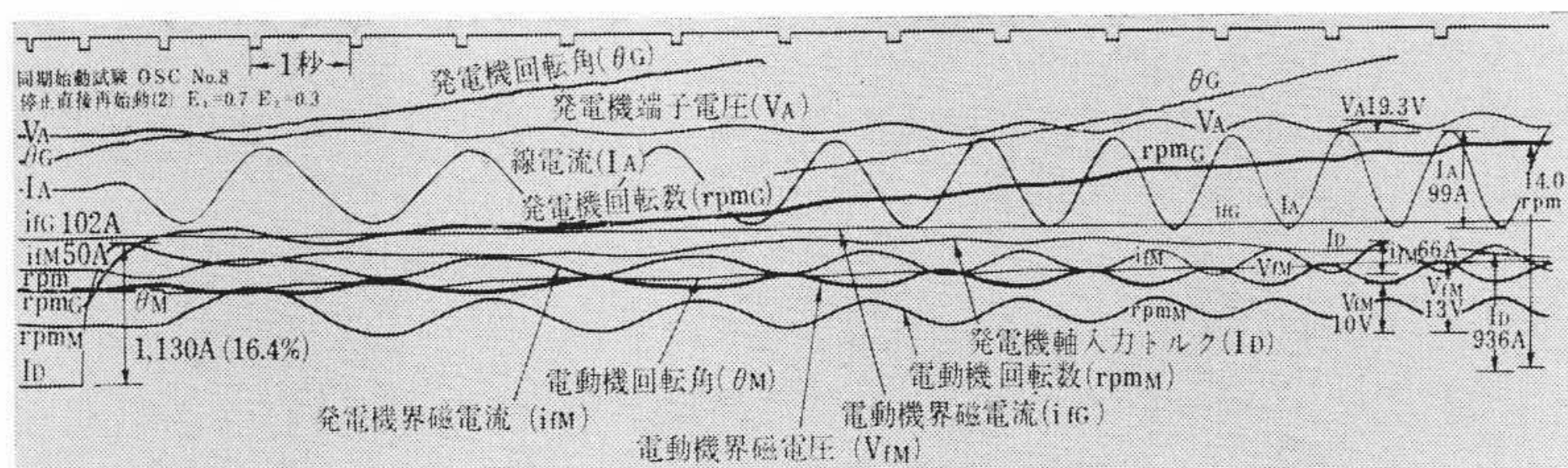


図2 実測値と計算値との比較
(5,000 kVA G—5,000 kW M)



(a) 同期始動



(b) 同期始動失敗

図3 同期始動オシログラム (5,000 kVA G—5,000 kW M)

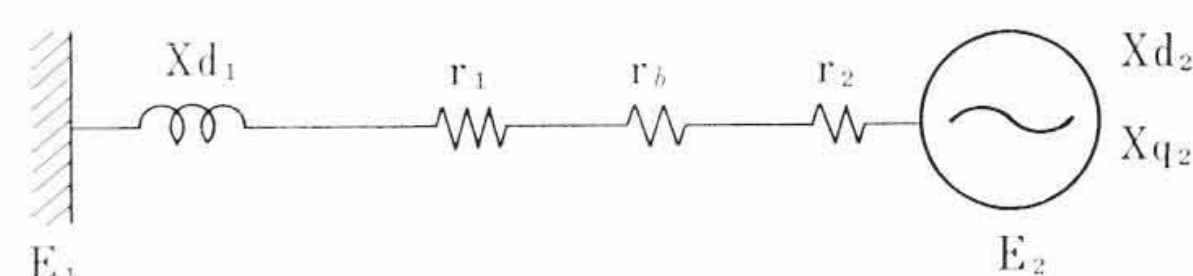


図4 等価回路

- (iv) G, M 相互の初期位相角 (θ_{10}, θ_{20})
- (v) G に与えられる軸トルク (T_1)
- (vi) M の摩擦トルク (T_2)
- (vii) G, M の励磁電圧 (E_1, E_2)

があげられる。いったん両者が同期して加速しはじめてからの同期加速の段階では電動機を脱調しないようにするため発電機に与えるトルクは電動機最大トルクよりも小さくしなければならない。したがって機械定数が定まりそのときの励磁が決まると発電機に与えられる最大トルクが決まり最大加速度が決ってしまう。それゆえ実際運転の場合には、ガイドペーン開度と水車のトルク特性に留意しなければならないことになる。定格速度にまで到達したら、同期並列することができる。この場合、始動用励磁装置を用いている場合には、主励磁装置との切換が必要となる。

3. 理論的考察

3.1 同期始動の計算

同期機の過渡現象解析にはいろいろな方法があるが、その取扱が容易なように次のような仮定を設定してステータに基準軸をおく α, β 法で計算した⁽²⁾。

- (i) 対称形回転子機とし、同期機の等価回路を抵抗とリアクタンスにおきかえ、リアクタンスとしては x_d' を使用する。
- (ii) 始動期間中励磁およびリアクタンスを一定とする。このことは回転子磁束が一定かもしくは適当な平均値で表わされるものとする。
- (iii) 制動効果を無視する。
- (iv) 飽和の影響を無視する。

この結果次の計算式がえられる。

$$\left. \begin{aligned} p i_\alpha &= \frac{\omega_B}{x} [-r i_\alpha - E_1 n_1 \sin \theta_1 + E_2 n_2 \sin \theta_2] \\ p i_\beta &= \frac{\omega_B}{x} [-r i_\beta + E_1 n_1 \cos \theta_1 - E_2 n_2 \cos \theta_2] \\ p n_1 &= \frac{1}{M_1} [-E_1 (i_\beta \cos \theta_1 - i_\alpha \sin \theta_1) - T_1] \\ p n_2 &= \frac{1}{M_2} [-E_2 (i_\alpha \sin \theta_2 - i_\beta \cos \theta_2) - T_2] \\ p \theta_1 &= \omega_B \cdot n_1 \\ p \theta_2 &= \omega_B \cdot n_2 \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

ここに $-E_2 (i_\alpha \sin \theta_2 - i_\beta \cos \theta_2) - T_2 \geq 0$ になるまでは $n_2 = 0$ として電子計算機で数値計算される。

上式に用いられた記号は下記のとおりである。

- i : 電機子電流 (P. U.)
- r : 電機子抵抗 (P. U.)
- x : 等価リアクタンス (P. U.) $= x_d'$ (直軸過渡リアクタンス)
- E : 励磁電圧 (P. U.)
- ω_B : $2\pi f$ (rad/s) ここに f は周波数 (c/s)
- θ : 回転角 (rad)
- T : トルク (P. U.)
- M : 単位時間定数 $= 2H$ (s)
- p : 微分演算子 ($p = \frac{d}{dt}$)

添字 α, β : α, β 成分の量を示す。

α, β と 3 相 a, b, c との関係は電流を例にとると

$$i_a = i_\alpha$$

$$i_b = -\frac{1}{2}i_a + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta$$

$$i_c = -\frac{1}{2}i_a - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta$$

添字 1, 2: 1は発電機, 2は電動機を意味している。

3.2 5,000 kVA 機による組合せ試験結果

計算値と実測値との比較として図1のように試験回路で試験したときの比較結果を図2に示す。これからして計算値が実際の同期可能範囲よりやや内側にあり, 本計算式で計算しておけば安全側といえる。図3はこの試験時のオシログラムで, 図3(a)は同期始動した場合, 図3(b)は同期失敗した場合を示している。

3.3 発電機軸に印加できる最大トルク

同期加速時に発電機軸に印加できる最大トルクを求めるために図4のように等価回路を考え, 任意速度 n (P. U.) における電動機へのトルク T を計算する。 T は電動機から発電機への流入を正とする。

$$T = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot x_q \sin \delta + E_1 \cdot E_2 \cdot \left(\frac{r}{n}\right) \cos \delta - E_1^2 \cdot \left(\frac{r}{n}\right) + \frac{1}{2} \cdot E_1^2 \cdot (x_d - x_q) \sin 2\delta}{x_d \cdot x_q + \left(\frac{r}{n}\right)^2} \dots\dots\dots (8)$$

$\left(\frac{dT}{d\delta}\right)_{\delta=\delta_0} = 0$ とすることにより, T の最大値を与える δ_0 が求められる。

$$\cos \delta_0 = -\frac{x_q E_2}{4(x_d - x_q) E_1} - \sqrt{\left\{\frac{x_q E_2}{4(x_d - x_q) E_1}\right\}^2 + \frac{1}{2}} \dots\dots\dots (9)$$

T の最大値 $T_{\max}$ は (10) 式となる。

$$T_{\max} = (T)_{\delta=\delta_0} \dots\dots\dots (10)$$

ここに, x_d : 等価直軸リアクタンス $= x_{d1} + x_{d2}$ (P. U.)

x_q : 等価横軸リアクタンス $= x_{q1} + x_{q2}$ (P. U.)

r : 等価抵抗 $= r_1 + r_b + r_2$ (P. U.)

δ : 相差角 (rad)

E : 励磁電圧 (P. U.)

添字 1, 2, b : 1は発電機, 2は電動機, b は母線を意味している。

(8)式において n の小さな範囲においては

$$T = \frac{n \cdot E_1 \cdot E_2}{r} \left(\cos \delta - \frac{E_1}{E_2} \right) \dots\dots\dots (11)$$

となり, いかなる δ に対しても電動機が電動機運転なるためには $E_1/E_2 \geq 1$ となる。

発電機軸に印加できる最大トルクとしては $T_{\max}$ より小でなければならない。

4. 同期始動実用上の問題点

同期始動の難易を決める要因としては前述のように7項目があげられるが, このうち割合容易に可変, 選定できるものとしては水車の発生トルクと発電機, 電動機の励磁であるため, これらに主眼を置いて検討した。

4.1 始動初期における励磁電圧の影響

励磁電圧を変えた場合の同期始動の安定性は図2の例に示すような安定領域がある。数種類の計算例および試験結果から要約して次のことがいえる。

- (i) $E_2/E_1 = 0.7 \sim 0.8$ 付近がもっともスムーズに始動できる。
- (ii) T_2 が大になると始動しにくくなり E_1, E_2 を大きくしなければならない。
- (iii) E_1, E_2 が大きいときには T_1 の与え方を相当大幅にかえても始動可能である。

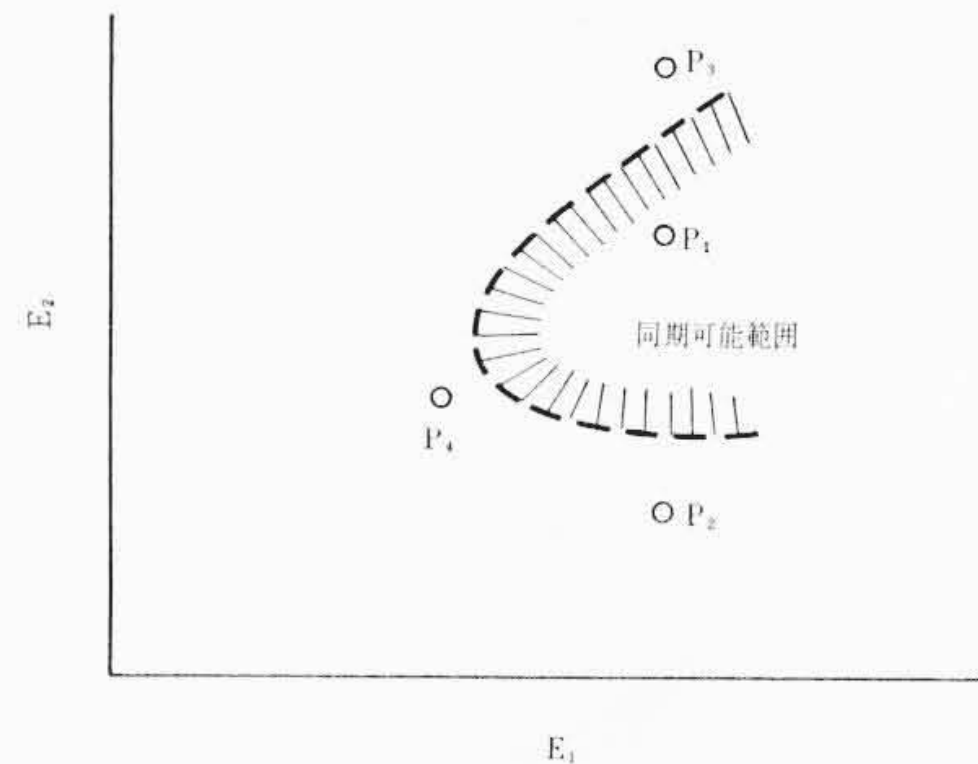


図5 励磁電圧の影響

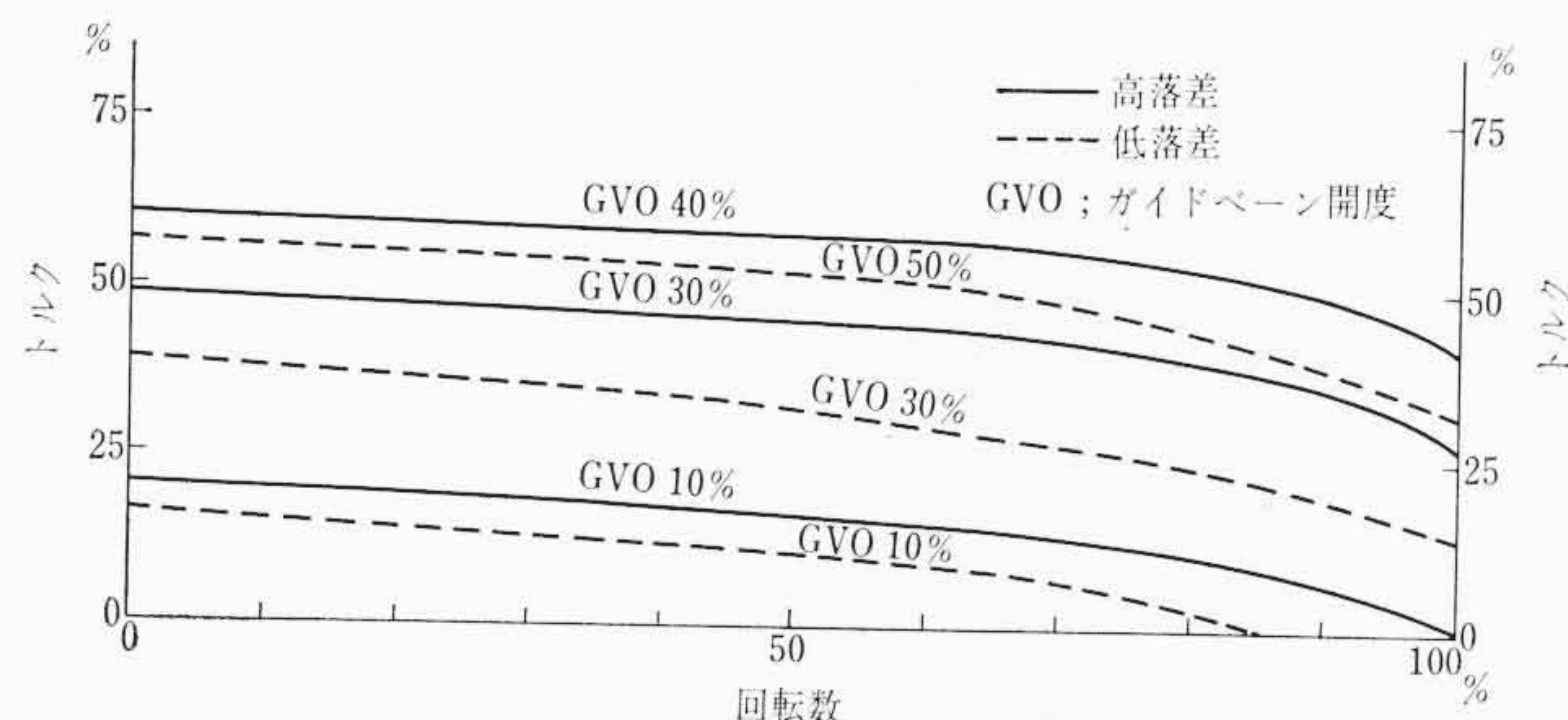


図6 発電専用機水車特性の一例

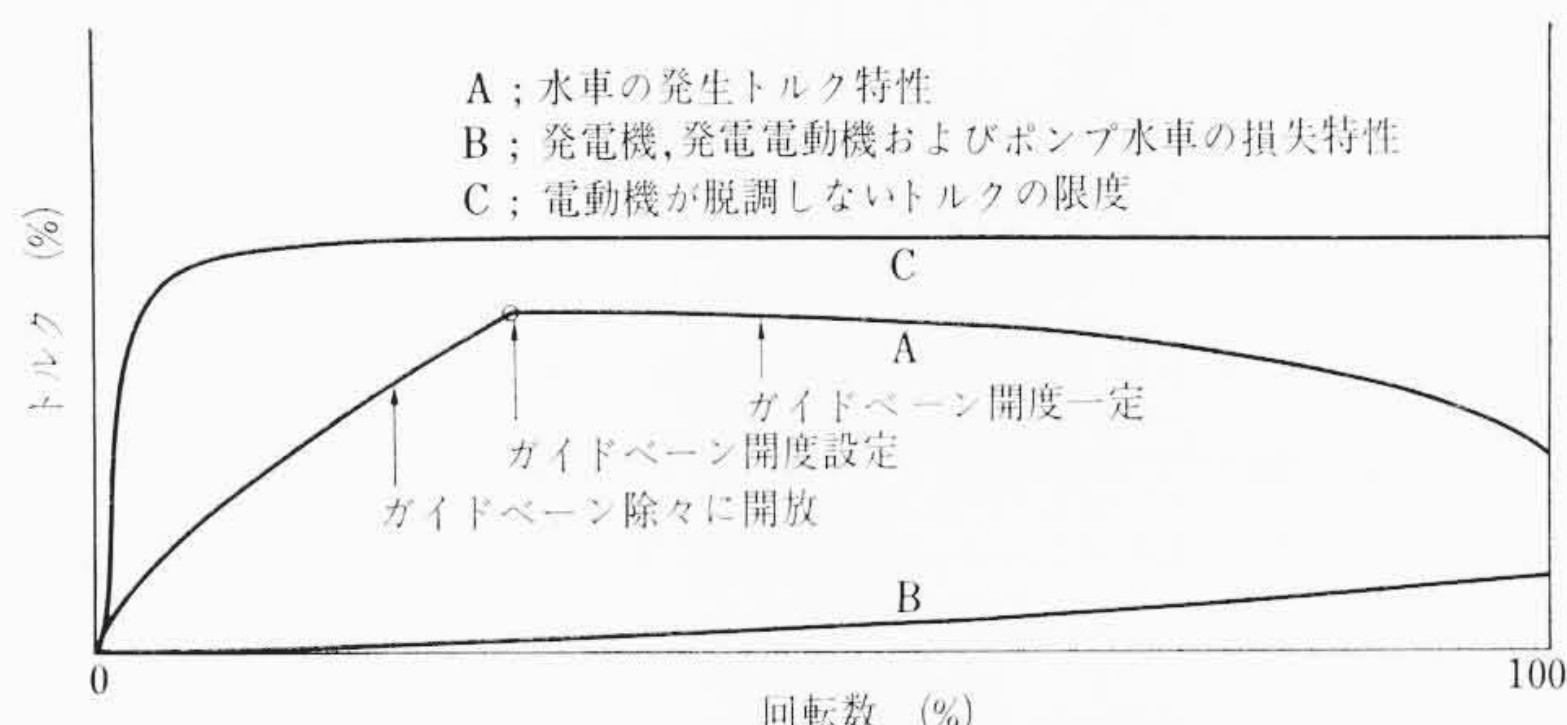


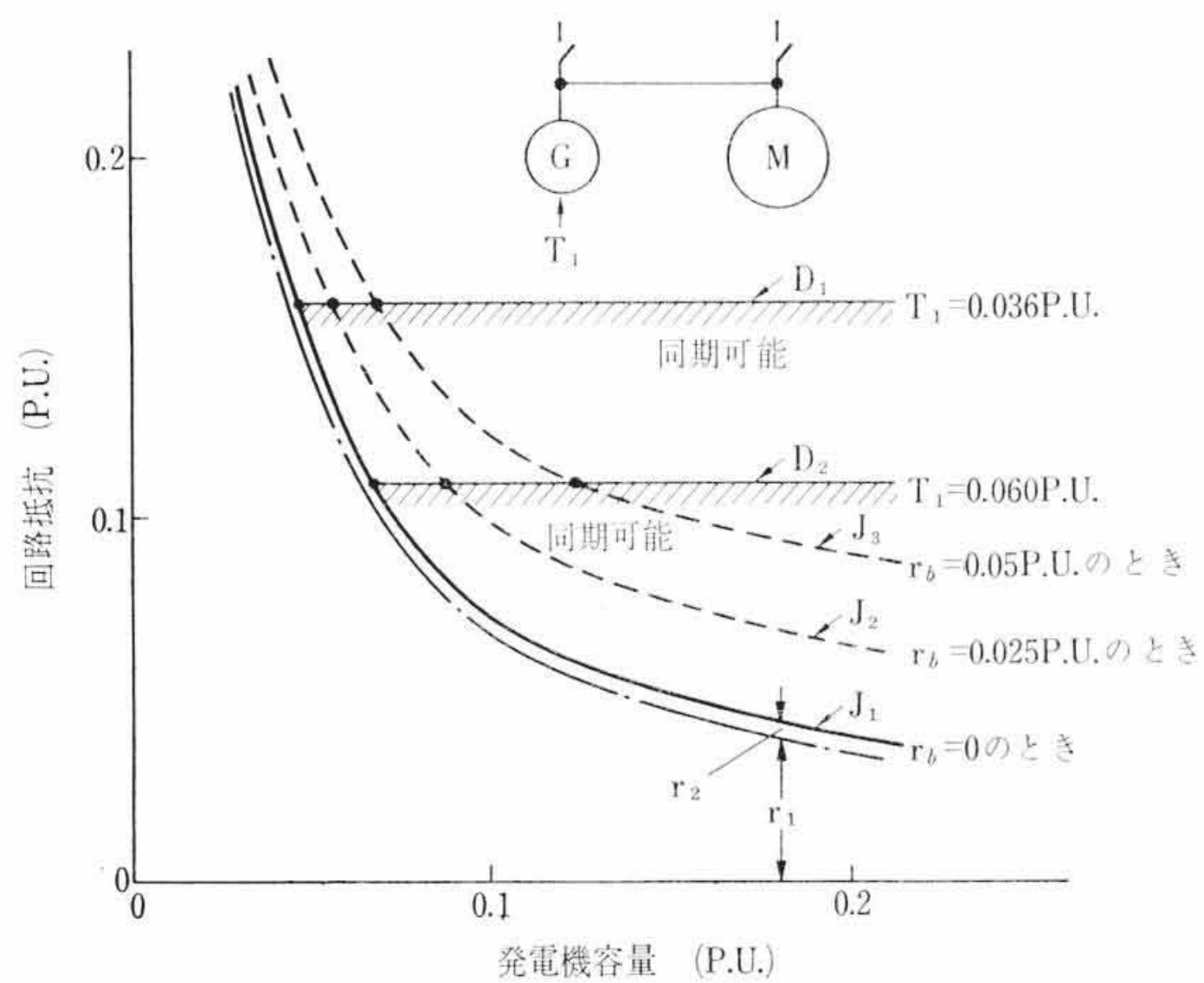
図7 同期始動時特性曲線

(iv) 励磁を大きくすることにより回路の抵抗が若干大きくても始動は可能となる。

これらの現象は定性的に次のように考えられる。図5において P_1 点ではスムーズに同期始動可能であるが, P_2 となると E_2 が小となり電動機に与えられるトルクも小となるので電動機に必要な加速を与えるには(1)式の I, δ を大にする必要があり T_1 大となる。 T_1 を大にするということは E_1, E_2 で決まる $T_{\max}$ に近づくことで不安定になりやすい。 $P_3 (E_1 < E_2)$ では両機の相差角によっては電動機が発電機に電力を供給する場合が起こり, 電動機は減速される状態になる。電動機が減速されると, 電動機の発生電圧が小さくなり, 発電機から電動機に電力を供給する。この繰返しのために不安定となる。 P_4 となると発生トルクが小さくなり T_{20} に打ち勝つためには発電機の発生電圧を大きくせざるを得ない。すなわち発電機の回転数が高くならざるを得なくなり, 発電機の独走となりやすく不安定となる。また同期したあとでも, E_1, E_2 が小なるため $T_{\max}$ が小さくあまり加速を大きくすることができない。

4.2 始動途中における水車トルクと励磁電圧の関係

始動途中では水車トルクにほぼ比例して加速するが, 水車トルクとガイドベーン開度との関係は図6に示すように回転数に対して垂下特性を有している。シーケンスの複雑さを避けるためにはガイドベーン開度を加速途中において可変することを極力避け落差により段階的に変える程度としたい。そのような場合にはある一定時間でガイドベーンを開いたあと, そのままの開度で同期付近まで水車のトルク特性のままに加速し, その後ガバナ運転となる。このガイド



計算定数(電動機基準)
 r : 回路抵抗(P.U.)=発電機抵抗 r_1 +電動機抵抗 r_2 +母線抵抗 r_b
 r_1 は発電機基準で0.007 P.U.とし、 r_2 は0.005 P.U.とした。
 x : 回路リアクタンス(P.U.)= $0.3 \times \frac{1}{G} + 0.3$
 M_1 : 発電機ユニットの単位時間定数=18G(s)
 M_2 : 電動機ユニットの単位時間定数=9(s)
 T_1 : 発電機軸へのトルク(P.U.)
 T_2 : 電動機ユニットの損失トルク=0.01(P.U.)
 E_1 : 発電機励磁電圧=1.3(P.U.)
 E_2 : 電動機励磁電圧=1.0(P.U.)
 G : 発電機容量(P.U.)
 D 曲線: 同期可能限界
 J 曲線: G と r との関係

図8 発電機容量および回路抵抗の影響

ベーン開度をいくらに選定するかは始動時間の関係で決まるが、少なくとも電動機の定格回転付近での損失(発電機自体の内部発生損失を含む)を補えるだけのトルクを発生しうるガイドベーン開度でなくてはならない。

したがって水車専用機発生トルクとしては図7のAのようになる。Bは負荷特性である。電動機が脱調しないトルクの限度Cは(10)式より与えられ、CはAよりも常に高いことが必要で、この条件からも励磁 E_1 、 E_2 は制約を受ける。

始動用専用励磁装置をおく場合、経済的見地から極力小容量のものとしたいが、図2のような同期始動の安定性に図7のC特性を考慮して決定すべきで、普通には、後者の特性で決まることが多いことに注意すべきである。

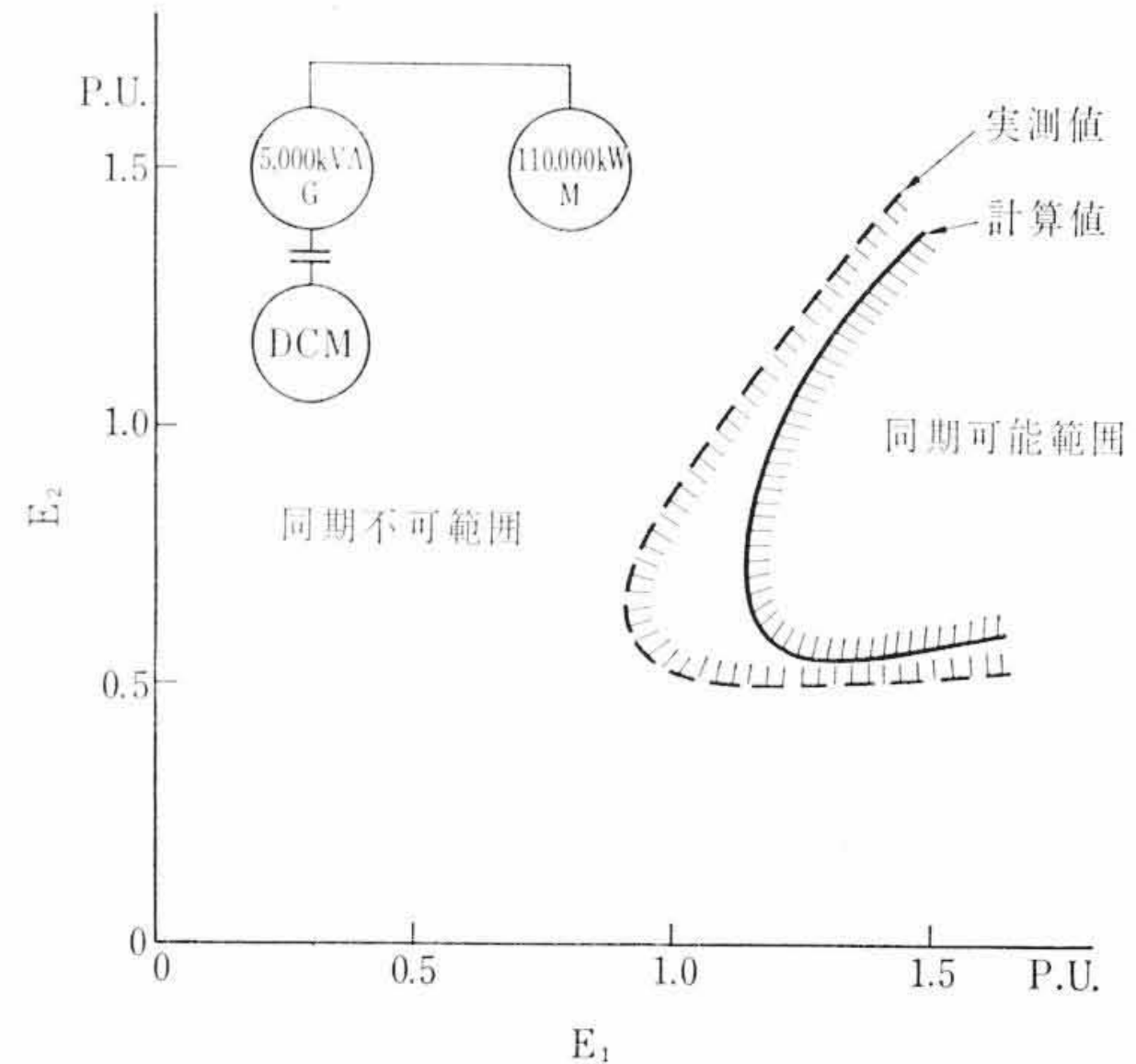


図10 励磁電圧と同期可能範囲
(5,000 kVA G—110,000 kW M)

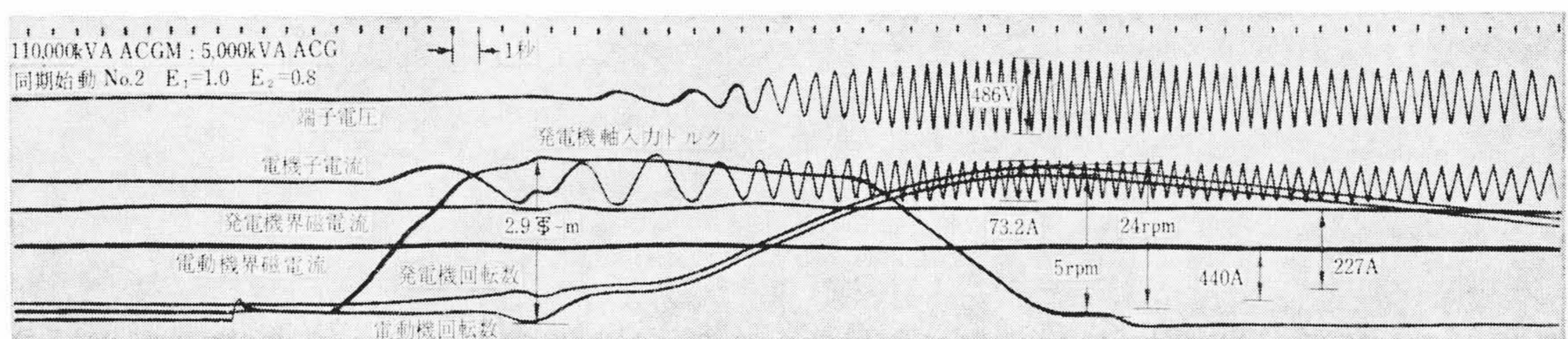
4.3 発電専用機の選定と回路抵抗の影響

発電専用機が発電動機とは別のところに設定される場合には、発電機、電動機間の母線の抵抗値に特に注意しなければならない。

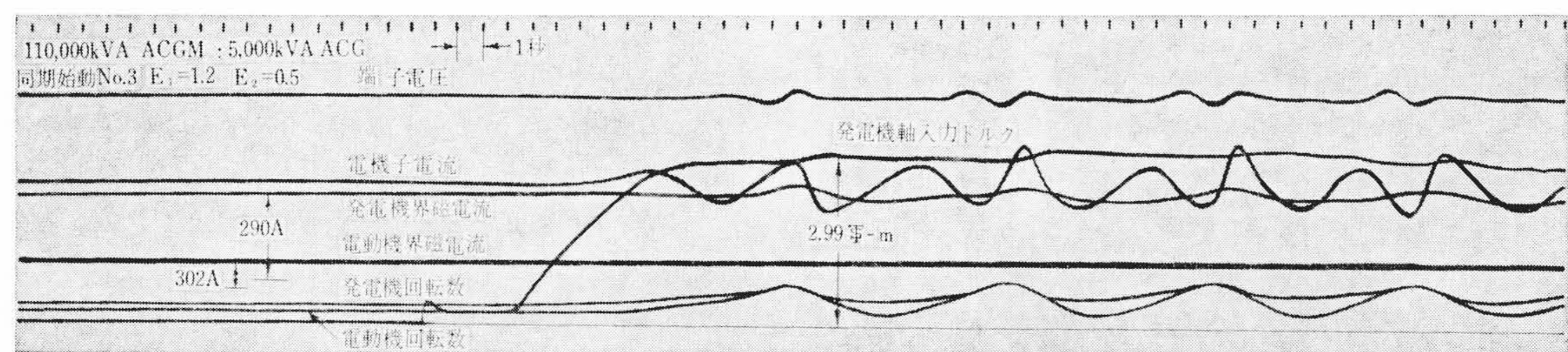
また小容量の発電専用機で同期始動する場合に、どの程度の専用発電機で起動できるかの問題がある。図8はこの関係を計算で求めたもので母線抵抗が無視できる場合には、 $T_1=6\%$ のとき電動機の7%の容量でも同期始動可能なことを示している。母線抵抗が5%あるときには D_2 と J_3 との交点より発電機容量は12%必要となる。実際には定格速度での電動機ユニットの無負荷損失をかね合わせて発電機容量が決定される。

図9は110,000 kW 電動機を約5%容量の5,000 kVA 発電機で始動したときのオシログラムで、(a)は同期始動した場合、(b)は同機失敗した場合は示している。この試験において、それぞれの励磁電圧と同期始動可否の関係を求めると図10のようになっている、先の図2の結果と同様に、計算値は実測値より安全側となっている。

一般には発電機、電動機間に同期始動母線を設けてトランスの1次回路も遮断器で開放するが、この遮断器を設けない場合には、発電機と電動機間にトランスの1次回路が並列接続となり、図11のように(a)なる回路は電動機に等しい電流を流すため等価的に(b)回路のようになり、回路抵抗がそれだけ増大する。

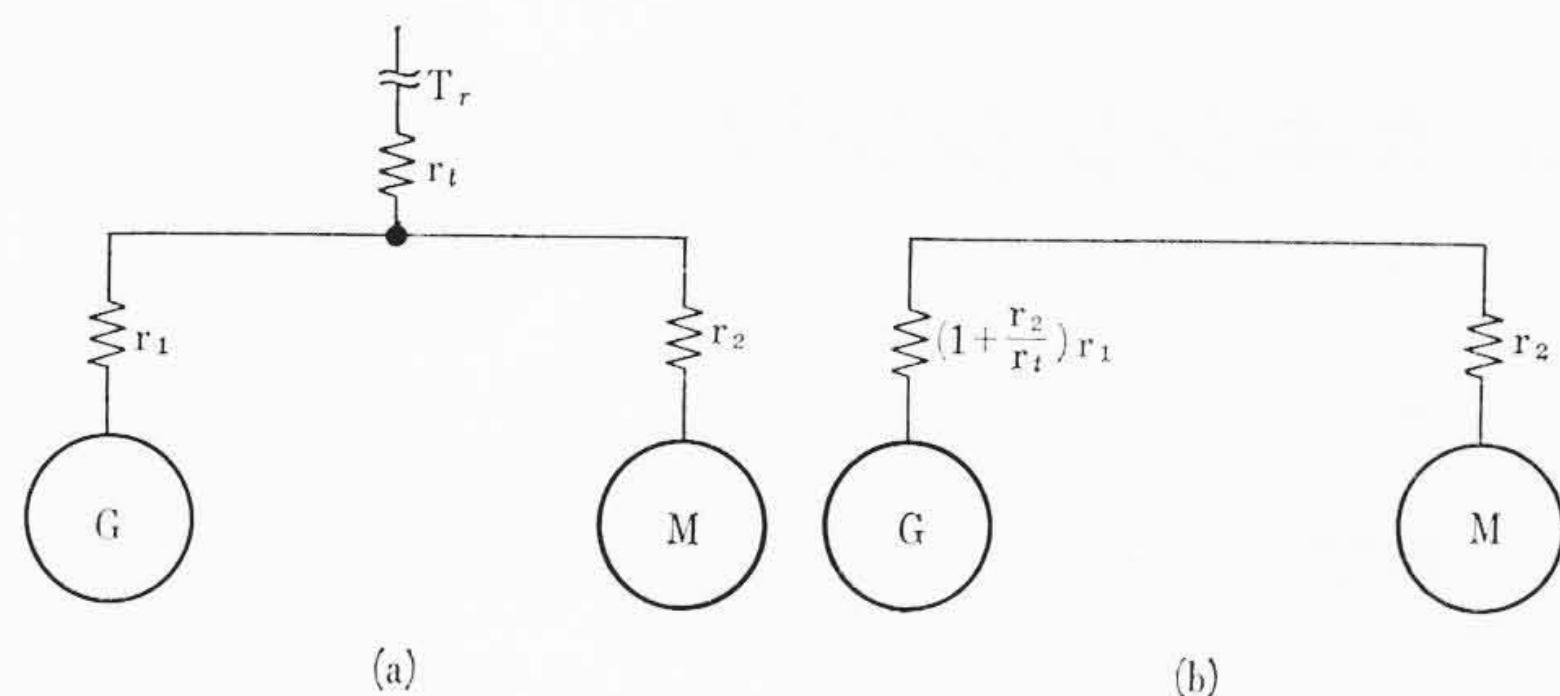


(a) 同期始動



(b) 同期始動失敗

図9 同期始動オシログラム
(5,000 kVA G—110,000 kW M)


 図 11 トランスの 1 次抵抗 (r_t) の影響

4.4 複数台同時始動

1 台の専用発電機で 2 台以上の電動機を始動する場合には、始動は困難となるが、その程度は図 1 と同じ 5,000 kW 電動機をさらに 1 台追加して試験した結果では図 12 に示すように 1 台の電動機始動の図 2 とほぼ同一傾向を示しており、2 台の電動機を同時に始動する場合の同期可能範囲は、1 台の電動機を始動する場合のそれと、あまり差がないことがわかった。

4.5 そ の 他

以上のほか、試験機により次のことが確認された。

(1) 慣性の大きさ

一般には機械の特性上から決まり可変することは困難であるが、発電機の慣性は大きく、電動機の慣性は小さいほうがよい。

しかし E_1 , E_2 を適当に選ぶことによりこの影響はあまり問題とならない。

(2) 初期位相角

最適初期位相角は(7)式から求められるが、その影響が表われるのは、同期可能範囲の限界付近で、一般にはこの影響はあまり問題とはならないと考えてよい。

(3) 電動機の摩擦トルク

この影響は始動の難易に関係するので極力小さなことが必要で、普通には始動時に推力軸受に圧油を送入するオイルリフトが設けられる。

(4) 始動用母線容量

始動用母線の抵抗は小さなほうが望ましいが、母線容量の決定に当たっては次のことを考慮すべきである。

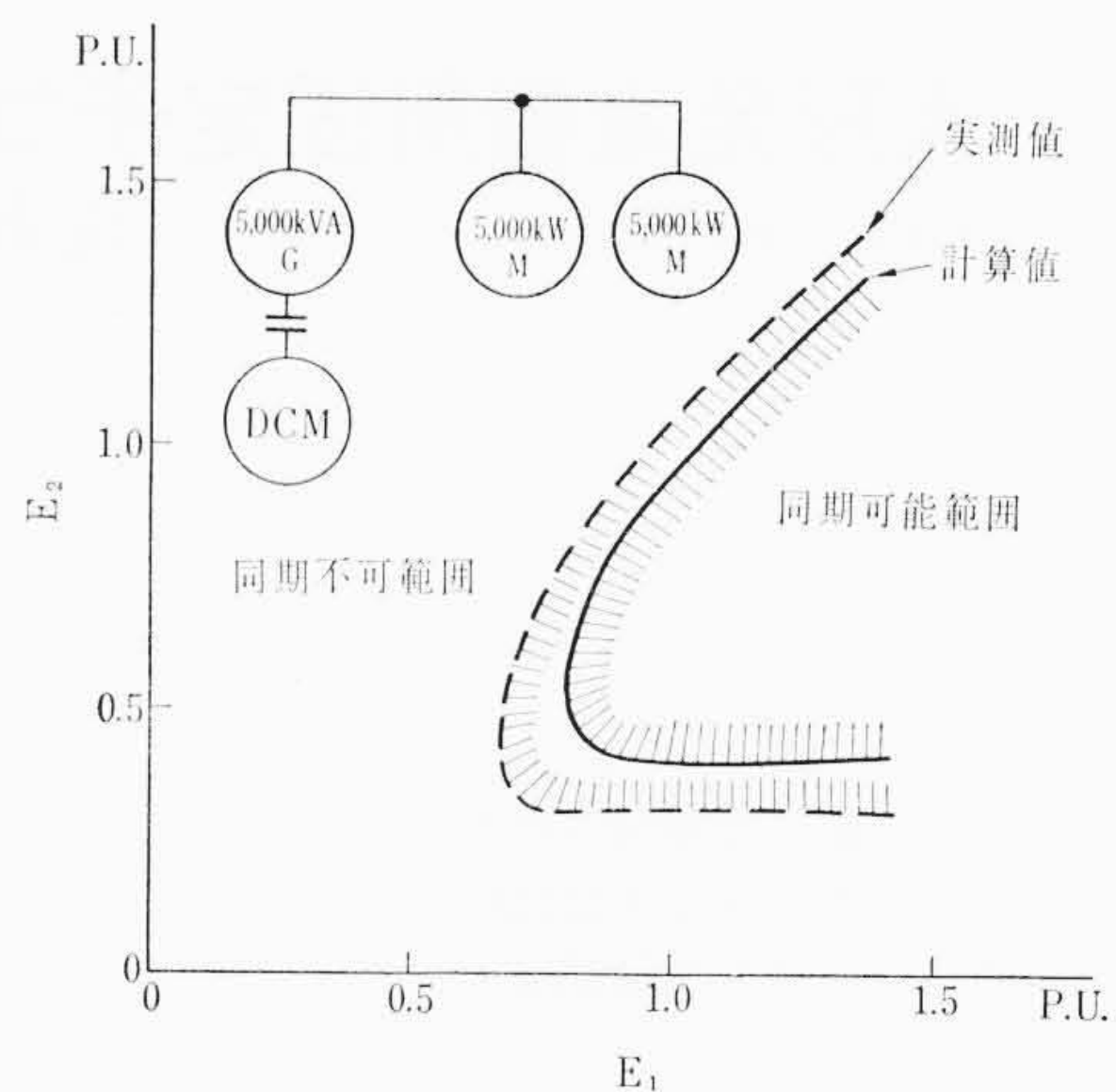


図 12 2 台電動機始動時の特性

始動初期時線路を流れる電流値は一般に小さく、同期加速中に最大電流が流れる。しかし発電専用機と電動機が始動用母線を介して系統に並列した状態での短絡事故を考えるとこの電流は相当に大きな値であるので機械的に耐える母線とする必要がある。

5. 結 言

同期始動の難易を決める諸要因のうち、割合容易に可変選定できるものとして発電機、電動機の励磁と発電専用機への入力トルクをとりあげ、これに主眼を置いて計算と実測から検討を行なった。

また、付近の発電所の専用発電機で始動する場合を考えて電動機の 5% 容量の発電機で始動試験を行ない、確実に始動することを確認した。

これらの検討結果が同期始動を計画されるうえでの参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 田 附：日立評論 46, 1858 (昭 39-11)
- (2) C. Concordia: T. A. I. E. E. 64, 629 (1945-9)
- (3) C. Concordia: Synchronous Machine