

自励交流発電機の強制自動同期化について

On Forced Automatic Synchronization of Self-Excited A. C. Generators

横 田 馨* 奥 田 健 三**
Kaoru Yokota Kenzō Okuda

内 容 梗 概

従来、交流発電機の並列接続には電圧、周波数、位相を合わせて手動にて並列投入する場合と、自動電圧平衡装置、自動揃速装置、自動閉合装置をもった自動同期投入方式とがあった。最近の自励交流発電機の発達には、簡便に自動並列接続が可能で、いわゆる抑制リアクトルによる強制自動同期化装置を可能ならしめた。

日立製作所ではこの新しい方式のリアクトルによる強制自動同期化装置を完成し、このたび日立造船株式会社に400 kVA 船用自励交流発電機の強制自動同期化装置を納入した。本装置は、現在好調のうちに運転中である。

1. 緒 言

交流発電機の並列接続に際しては電圧の大きさ、周波数、位相を完全に一致させなければならないことは周知のとおりであるが、手動で行なおうとすると熟練が必要で操作に時間を要し、また完全自動で行なおうとすると経済性に問題があった。しかるに抑制リアクトルによる新しい方式の強制自動同期化装置の出現は、自励交流発電機の発達とあいまって上記二方法の中間を行くものとして近時船用方面でとくに注目されてきた。すなわち周波数、電圧を一定値以内に調整し交流発電機をリアクトルを介して位相には無関係に母線に接続し交流発電機の同期投入を行なおうとするものである。同期投入完了後はリアクトルを主回路から切りはなして運転を続ける。

日立製作所では中容量の自励交流発電機の並列接続に強制自動同期装置を採用するため電子計算機による理論的解析を行なうとともに各種試験を行なった結果、優秀な成績をあげたのでその概要を紹介する。

2. 強制自動同期方式の特長

強制自動同期方式は従来の手動および完全自動同期方式（自動電圧平衡装置、自動揃速装置、自動閉合装置をもった方式）に比べて下記のような特長を有している。

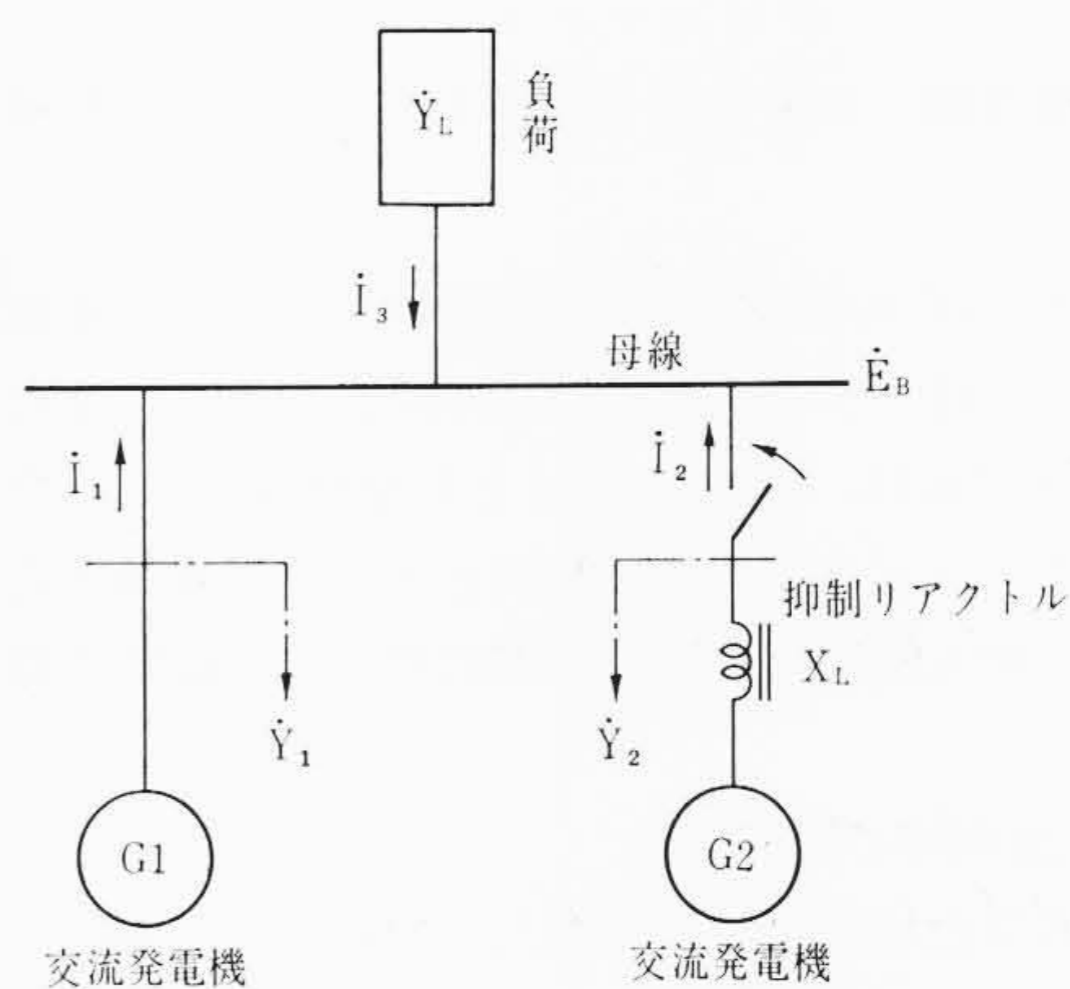
- (1) 装置が簡単、堅ろうであるため経済的で過酷な使用条件の所でも安全確実に使用できる
- (2) 電圧、周波数がある一定値以内であることを確認しさえすれば押ボタンによる発電機の同期投入が可能でなんら熟練を要しない。
- (3) 完全自動同期方式に比して保守、点検がきわめて簡単である。

本方式は以上のような特長を有しているが同期投入時の交流発電機と母線との電圧差、周波数差が比較的大きく、かつ位相に無関係に同期投入されるため発電機ならびに母線系統のじょう乱はある程度さげられない。しかしながら過渡応答の速い自励交流発電機の特徴がこれをおぎない系統運転には支障がない。

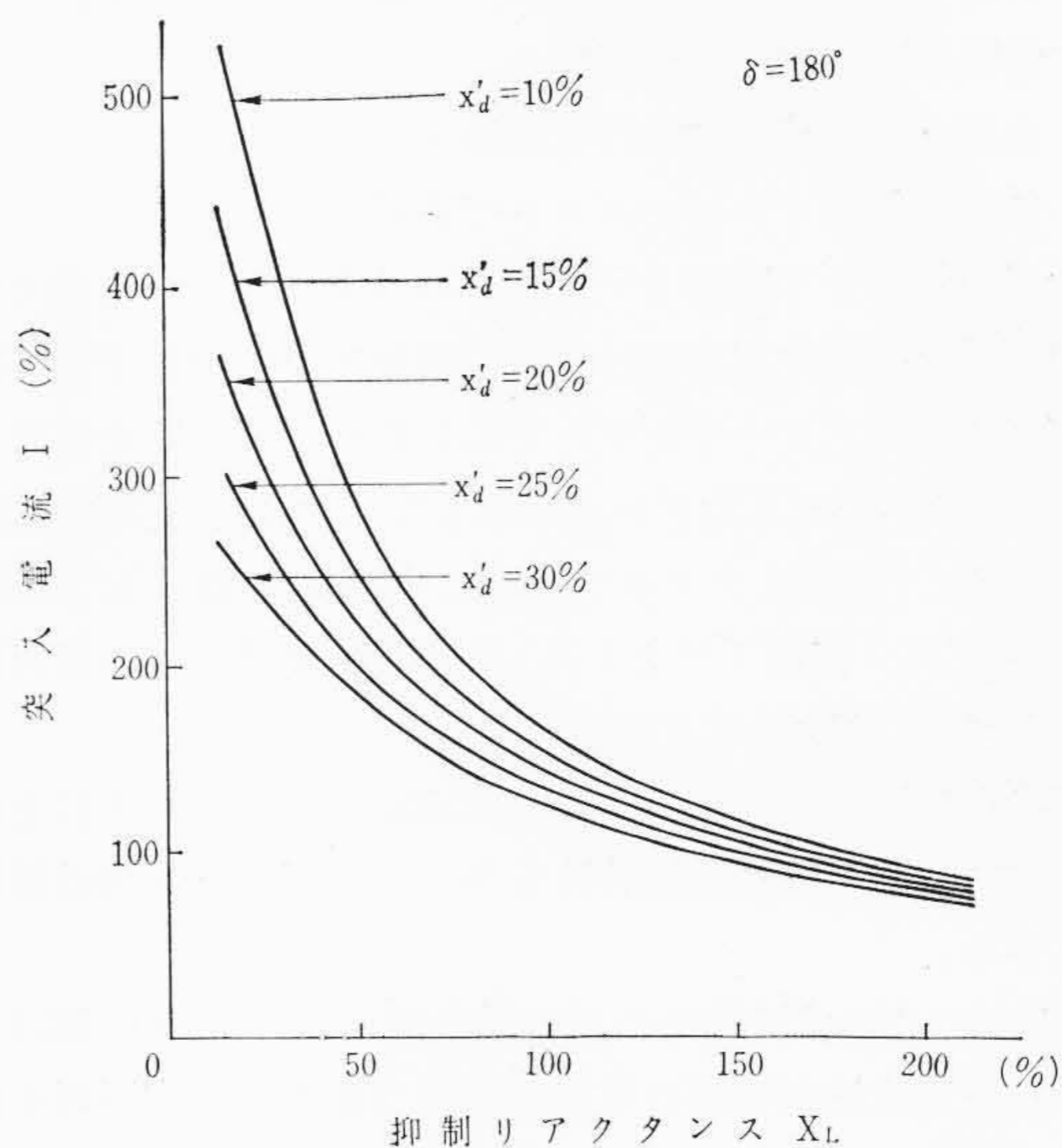
3. 理論的解析

3.1 抑制リアクトルに対する考察

強制並列時の母線電圧の変動を小さくし、各種機器への衝撃および負荷へのじょう乱を小さくするために、抑制リアクトルが発電機端子に直列にそう入される。リアクトルの値が過大であると、同期



第1図 回路図



第2図 突入電流と抑制リアクタンスの関係

機間の伝達インピーダンスが増加し、同期化トルク、制動トルクを弱め同期化しにくくなる。

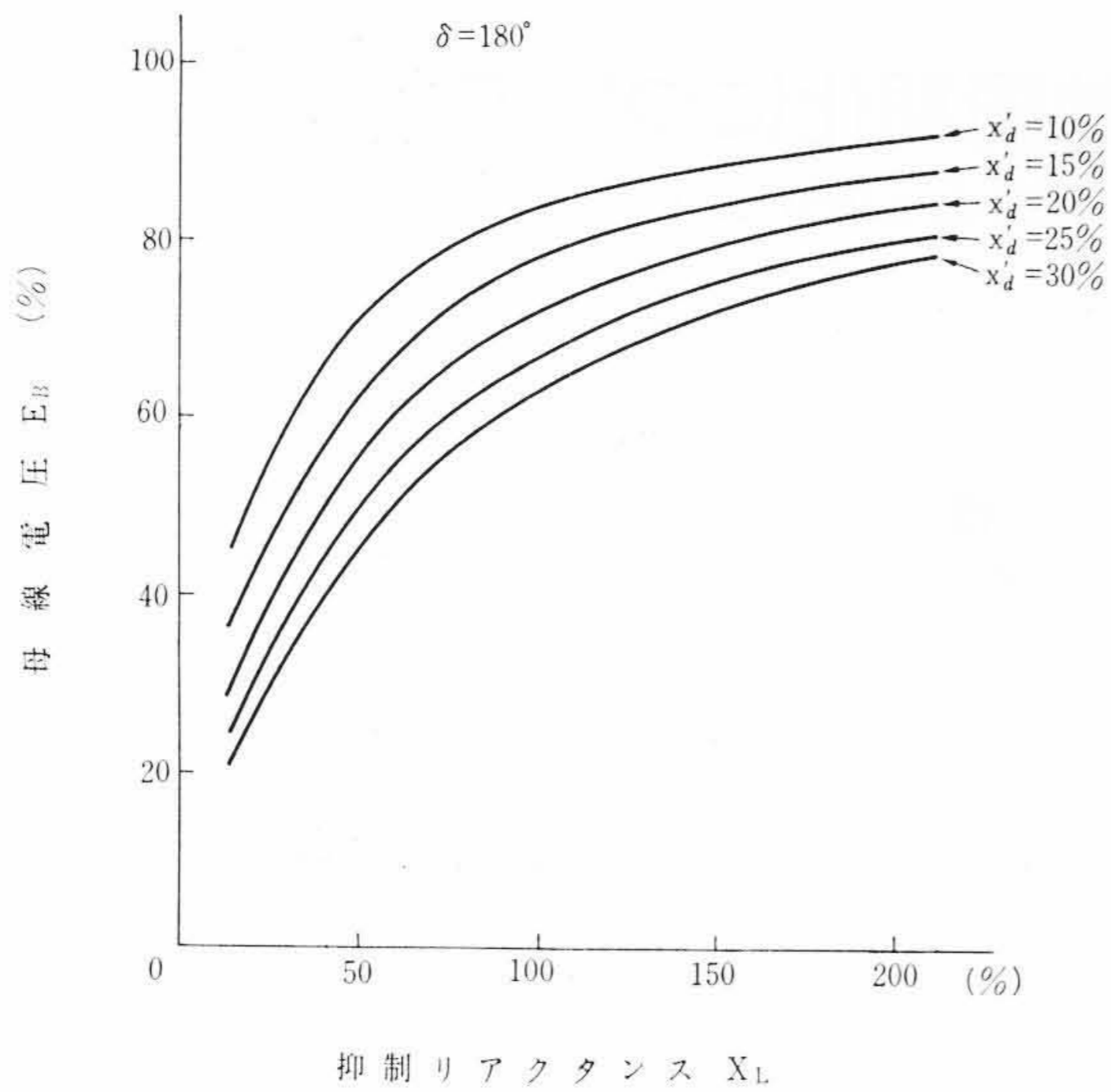
抑制リアクトルと突入電流、母線電圧の関係を第1図の回路について考察する。計算条件は

- (i) 発電機の内部電圧は100%とし負荷は無視する。
- (ii) 発電機インピーダンスとしては直軸過渡リアクタンス x'_d を考慮する。
- (iii) 並列時の初期相差角は、もっとも過酷な場合として180度とする。

以上の条件のもとで、発電機インピーダンスをパラメータにとって突入電流および母線電圧を示せば、第2,3図のようになる。同図に

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所日立研究所 工博



第3図 母線電圧と抑制リアクタンスの関係

よれば、たとえば $x'_d=20\%$ の発電機において突入電流を 150% に制限するためには、リアクトル $X_L > 93\%$ となり、また母線電圧を 80% 以上に保つには、 $X_L > 160\%$ としなければならない。この場合、同期機のインピーダンスは時間とともに過渡値から定態値に変化するから、突入電流は漸減するのに対し、母線電圧降下は増加する。

3.2 強制並列時の過渡現象

同期機の同期化現象の解析に当たり次の仮定に基づいて進めることとする。

- (1) 界磁束の変化は考慮するが、突極性は無視する。
- (2) 電機子回路抵抗は無視する。
- (3) 自励式励磁装置の動作を考慮する。
- (4) 負荷は静止インピーダンスで表現する。
- (5) 回転数により回路リアクタンスは変化しないものとする。

比較的単純な計算であるが、反復回数が多いので電子計算機を使用して、第4図のフロー・チャートにしたがって計算を行なった。

Read 200 で与える入力データのおもなものは、発電機の過渡リアクタンス x'_d 、同期リアクタンス x_d 、界磁時定数 T_{d0}' 、慣性定数 M 、制動係数 P_d 、抑制リアクトル X_L 、定格周波数 f 、計算時間刻み Δt で、計算は単位法による。

次に原動機特性は Read 300 または 400 によって、それぞれ原動機トルク対速度または调速機特性を与え、このうち前者は折線表示によっている。

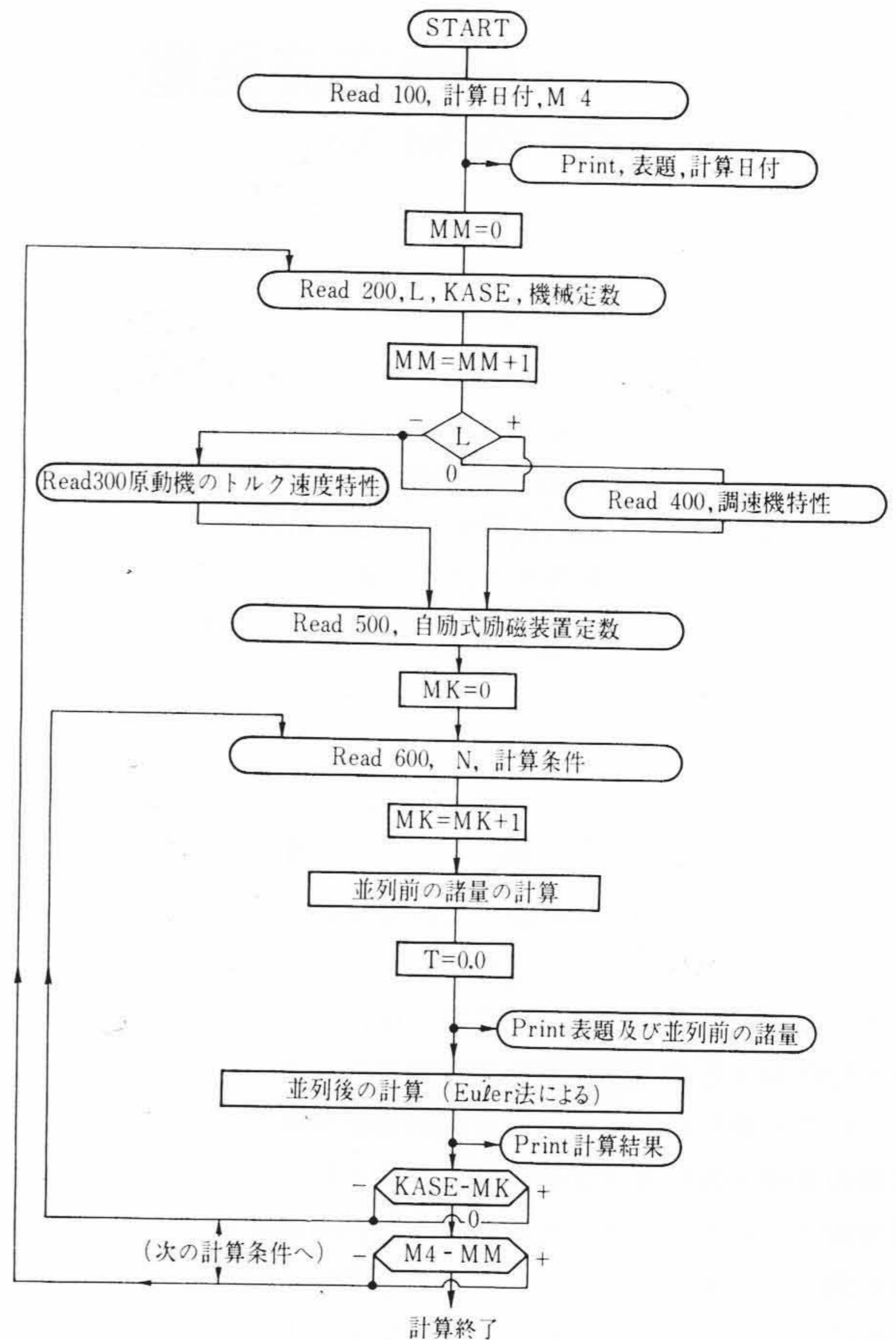
Read 500 で自励装置関係の諸定数を読み込む。第5図はここで対象とした自励式励磁装置の単線結線図である。動作原理を簡単に述べると、界磁入力リアクトル X_1 を介して供給される成分と飽和変流器 SCT から供給される成分との和から成っており、次式を満足するように、リアクトル X_1 および飽和変流器の特性が決定されている。

$$E_0 = f(X_{ex}) |\dot{E}_t + j X_s \dot{I}| \dots\dots\dots (1)$$

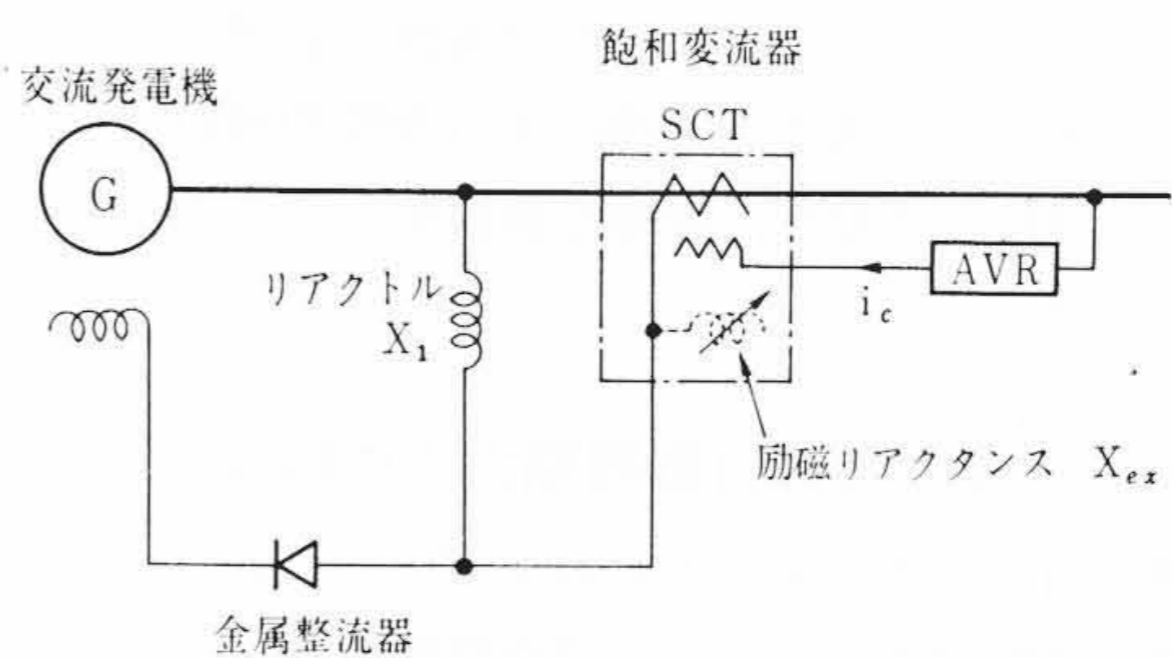
上式において、

- E_0 : 発電機内部電圧
- \dot{E}_t : 発電機端子電圧
- \dot{I} : 出力電流
- X_s : 電流補償度

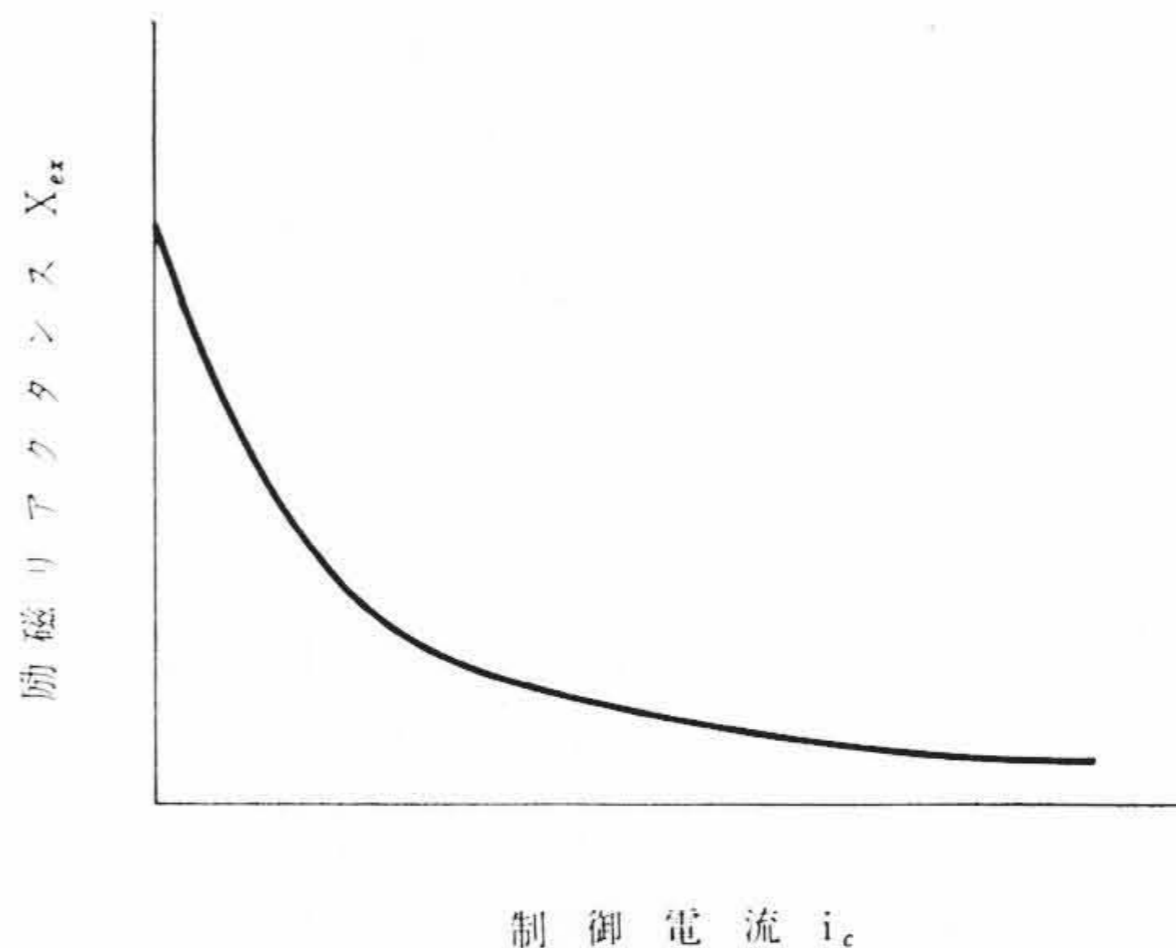
であって、 $X_s = x_d$ にすれば零力率負荷に対して、発電機端子電圧は一定に保たれることになる。しかし、実際には温度による界磁巻線抵抗の変化、発電機インピーダンスの飽和や突極性のために、微



第4図 計算のフロー・チャート



第5図 自励式励磁装置単線結線図



第6図 飽和電流器の励磁特性

細調整が必要である。そのため自動電圧調整器 (AVR) の直流出力電流 i_c を飽和変流器の制御巻線に供給し、変流器の励磁リアクタンス X_{ex} を制御する。上式の $f(X_{ex})$ はこのような AVR 効果を示す関数であって、無負荷定格電圧状態で $f(X_{ex})=1$ の関係がある。励磁リアクタンスと制御電流の関係は第6図のようであって、発電機端子電圧が下がれば、 i_c を減じ X_{ex} を増加せしめて、界磁電流を強めるように作用する。電子計算機にかける場合 $X_{ex} \sim i_c$ 特性曲線は折

線で与え、AVR系を一次遅れとすれば、AVR出力電流の変化分は次式で表わされる。

$$\Delta i_c = \frac{k'}{1+T_{ic}p}(E_t - E_{t0}) \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 k' : AVRの利得
 T_{ic} : 時定数
 E_{t0} : AVRの整定電圧

Read 600では計算条件として、計算時間、強制並列前の母線電圧、すべり、位相角、並列負荷を与える。

並列負荷をアドミッタンスで表わすと、

$$P_L + jQ_L = E_B(E_B \dot{Y}_L)^* \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 E_B : 母線電圧、基準ベクトルにとる
 $\dot{Y}_L = g_L - jb_L$: 負荷アドミッタンス
 *印は共役値

$$\therefore g_L = \frac{P_L}{E_B^2}, b_L = \frac{Q_L}{E_B^2} \dots\dots\dots(4)$$

運転中の1号機電流 \dot{I}_1 は

$$\dot{I}_1 = \frac{(P_L - jQ_L)}{E_B} \dots\dots\dots(5)$$

1号機の過渡リアクタンス背後電圧 \dot{E}'_1 は

$$\dot{E}'_1 = E_B + jx_d' \dot{I}_1 \dots\dots\dots(6)$$

で与えられる。(3)~(6)式により、並列前の諸量が求められる。

E'_1 は界磁束に対応するから並列前と並列直後では変化しないと考えるとさしつかえない。したがって、同期リアクタンス背後電圧に相当する内部電圧 E_1, E_2 は次式を解いてえられる。

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - Y_{11}(x_{d1} - x_{d1}') \cos \theta_{11} \\ Y_{12}(x_{d1} - x_{d1}') \cos(\delta_{12} - \theta_{12}) \\ Y_{12}(x_{d2} - x_{d2}') \cos(\delta_{21} - \theta_{12}) \\ 1 - Y_{22}(x_{d2} - x_{d2}') \cos \theta_{22} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} E'_1 \\ E'_2 \end{pmatrix} \dots\dots(7)$$

ここに、 Y_{ij} : 並列後の負荷を含めた駆動点および伝達アドミッタンス

$\theta_{ij} = Y_{ij}$ のインピーダンス角の余角、 $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ で2機間の相角。

上式から並列後の同期リアクタンス背後電圧 E_1, E_2 が求められる。次に発電機電流を計算する。第1図において、

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = (\dot{E}_1 - \dot{E}_B) \dot{Y}_1 \\ \dot{I}_2 = (\dot{E}_2 - \dot{E}_B) \dot{Y}_2 \\ \dot{I}_3 = -\dot{E}_B \dot{Y}_L \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0 \end{cases} \dots\dots\dots(8)$$

ここに、

$$\dot{Y}_1 = \frac{1}{jx_{d1}}, \dot{Y}_2 = \frac{1}{j(x_{d2} + x_L)}$$

なる関係があるから、各電流、母線電圧が求められる。さらに発電機出力は

$$\begin{cases} P_1 + jQ_1 = \dot{E}_B \dot{I}_1^* \\ P_2 + jQ_2 = (\dot{E}_B + jX_L \dot{I}_2) \dot{I}_2^* \end{cases} \dots\dots\dots(9)$$

で表わされる。

次に運動方程式は、

$$\begin{cases} p\omega_1 = \{T_{p1} - (P_1/\omega_1) - P_d(\omega_1 - \omega_0)\}/M_1 \\ p\delta_1 = 360\omega_1 \end{cases} \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 ω : 角速度 (p.u)
 ω_0 : 基準値
 T_p : 原動機トルク
 P_d : 制動トルク係数
 M : 単位慣性定数
 δ : 位相角 (度)

$$p = \frac{d}{dt}, t: \text{時間}$$

となり、2号機に対しても同様な関係式が成立する。

強制並列においては、並列後数秒以上の現象を検討する必要があるから、界磁束の変化を考慮しなければならない。界磁回路に関しては、

$$pE' = \frac{(E_f - E_1)}{T'} \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 E_f : 界磁端子電圧で自励装置出力電圧を用いる。なる関係があり段々法の計算において、各段階ごとに(7)式により同期リアクタンス背後電圧を補正して計算を進行する。 T' は等価開路時定数であって、次式で表わされる⁽¹⁾。

$$T' = \frac{L_f}{R_f + \frac{p}{2\pi} X}$$

上式で、

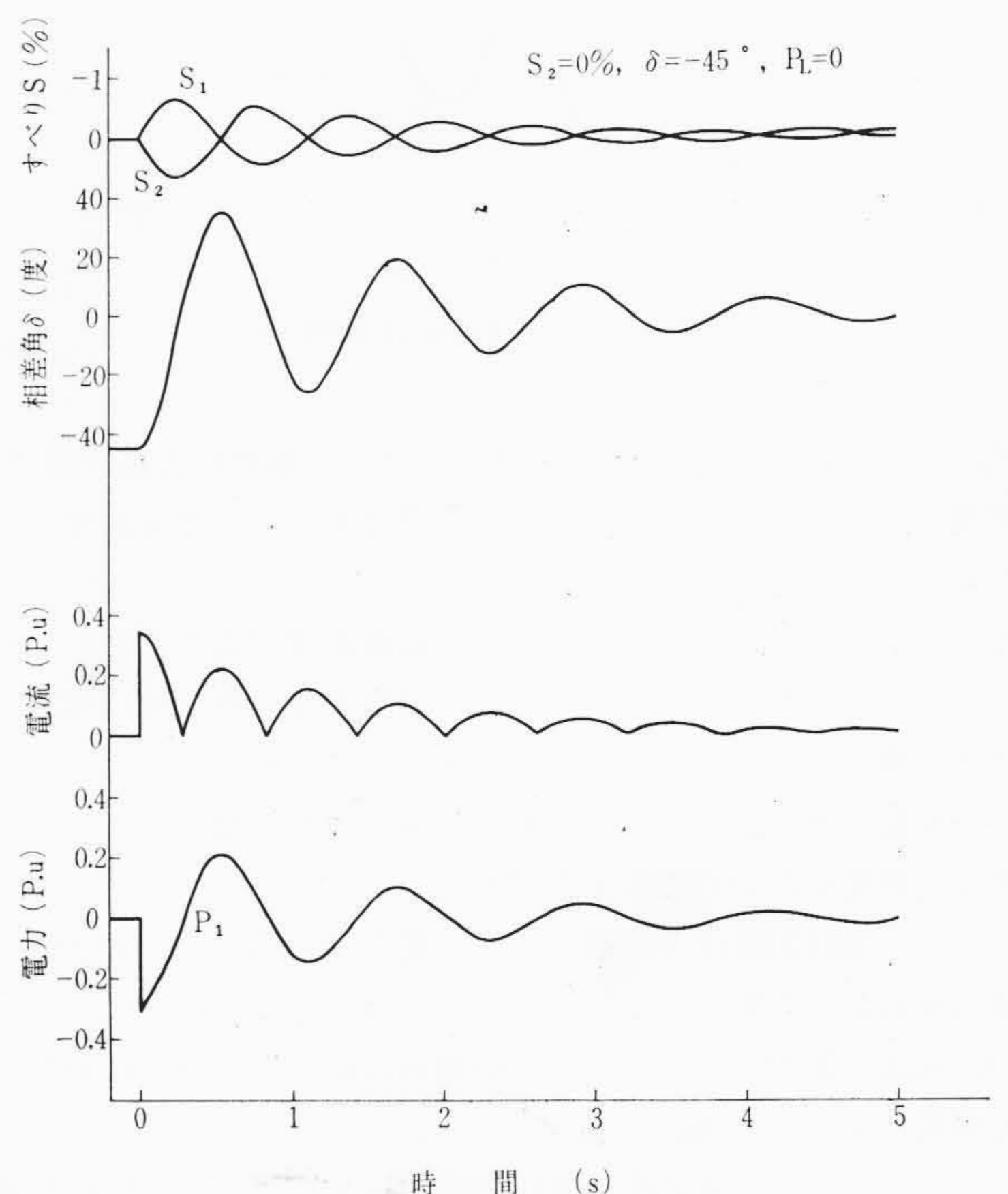
L_f, R_f : それぞれ界磁巻線のインダクタンスおよび抵抗
 p : 整流相数 (三相全波では $p=6$)
 X : 整流器の交流側リアクタンス

である。これからわかるように、自励式の場合整流器の交流側リアクタンスにより、発電機単体の開路時定数 $T_{a0}' = L_f/R_f$ より短くなる点を考慮しておく必要がある。

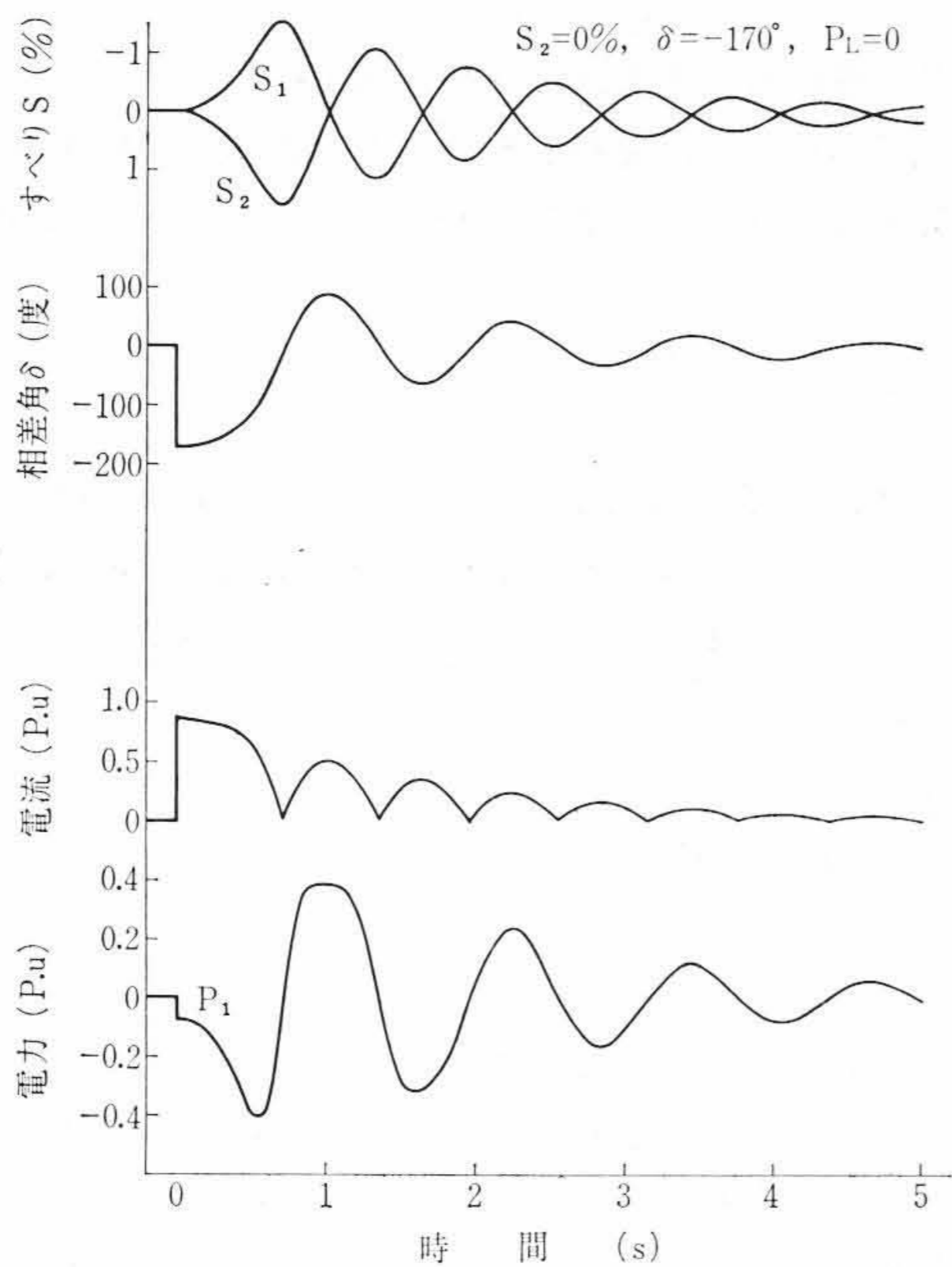
3.3 数値計算例

以上強制並列時の同期化現象の解析法について述べたが、ここでは後述する仕様の3φ400kVA発電機について解析した結果を記す。計算において1号機は強制並列時の位相角 $\theta_1=0^\circ$ 、すべり $s_1=0\%$ とし、抑制リアクトル $X_L=1.90$ p.uとする。

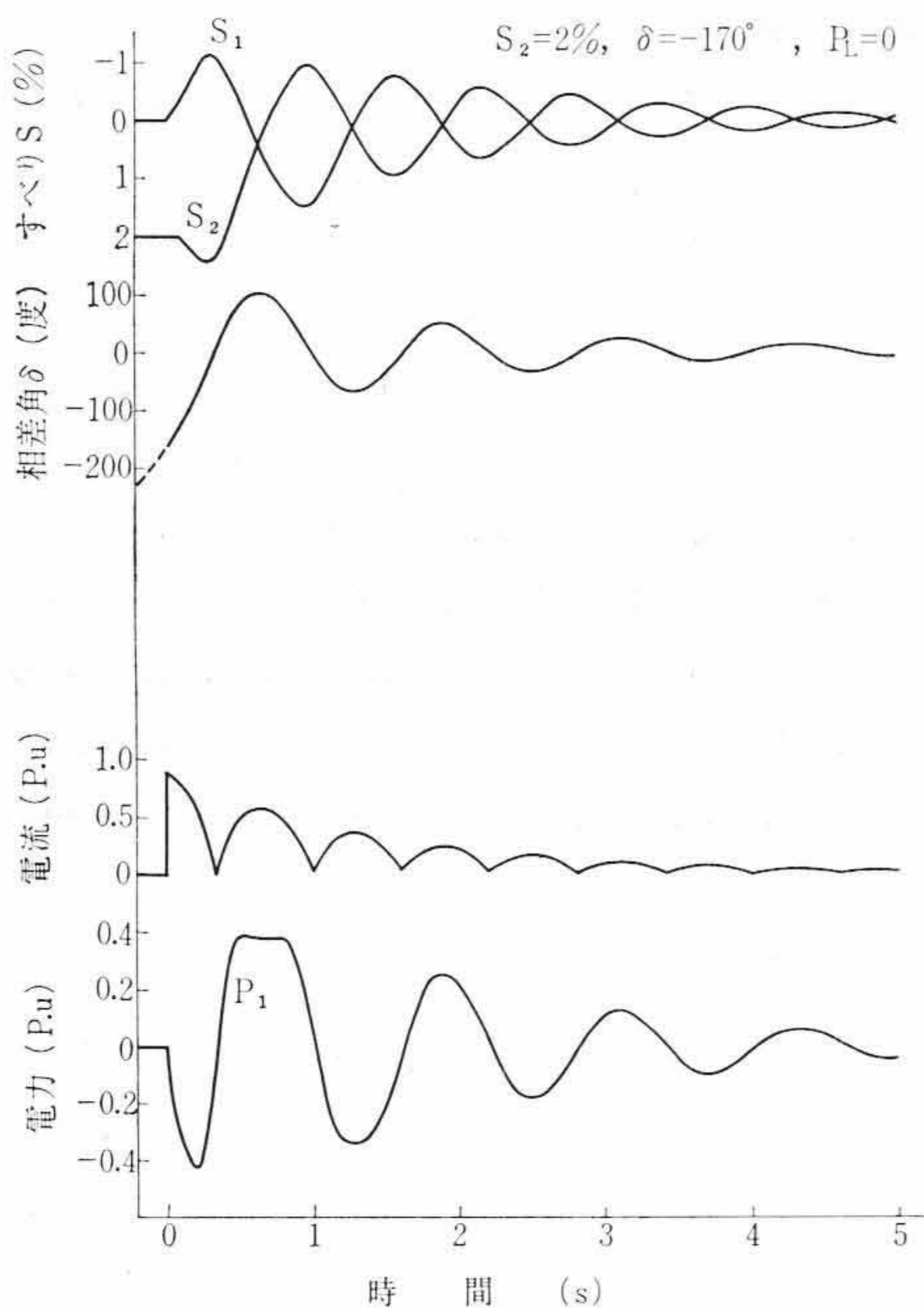
第7図は2号機のすべり $s_2=0\%$ 、位相角 $\theta_2=45^\circ$ で強制並列を行なった場合である。これによれば、1, 2号機ともすべり、相差角 $\delta = \theta_1 - \theta_2$ 、電力などは減衰正弦波振動を経て同期化する。同期化振動時のすべりの最大値は $\pm 0.7\%$ 、突入電流は34%、電力は31%であり、振動周期は1.2秒である。第8図は上の条件で2号機位相角を170度にした場合で、じょう乱は増加し同期化振動過程におけるすべりの最大値は $\pm 1.6\%$ 、突入電流は90%、電力は38%である。



第7図 強制並列時の計算例(1)



第8図 強制並列時の計算例(2)



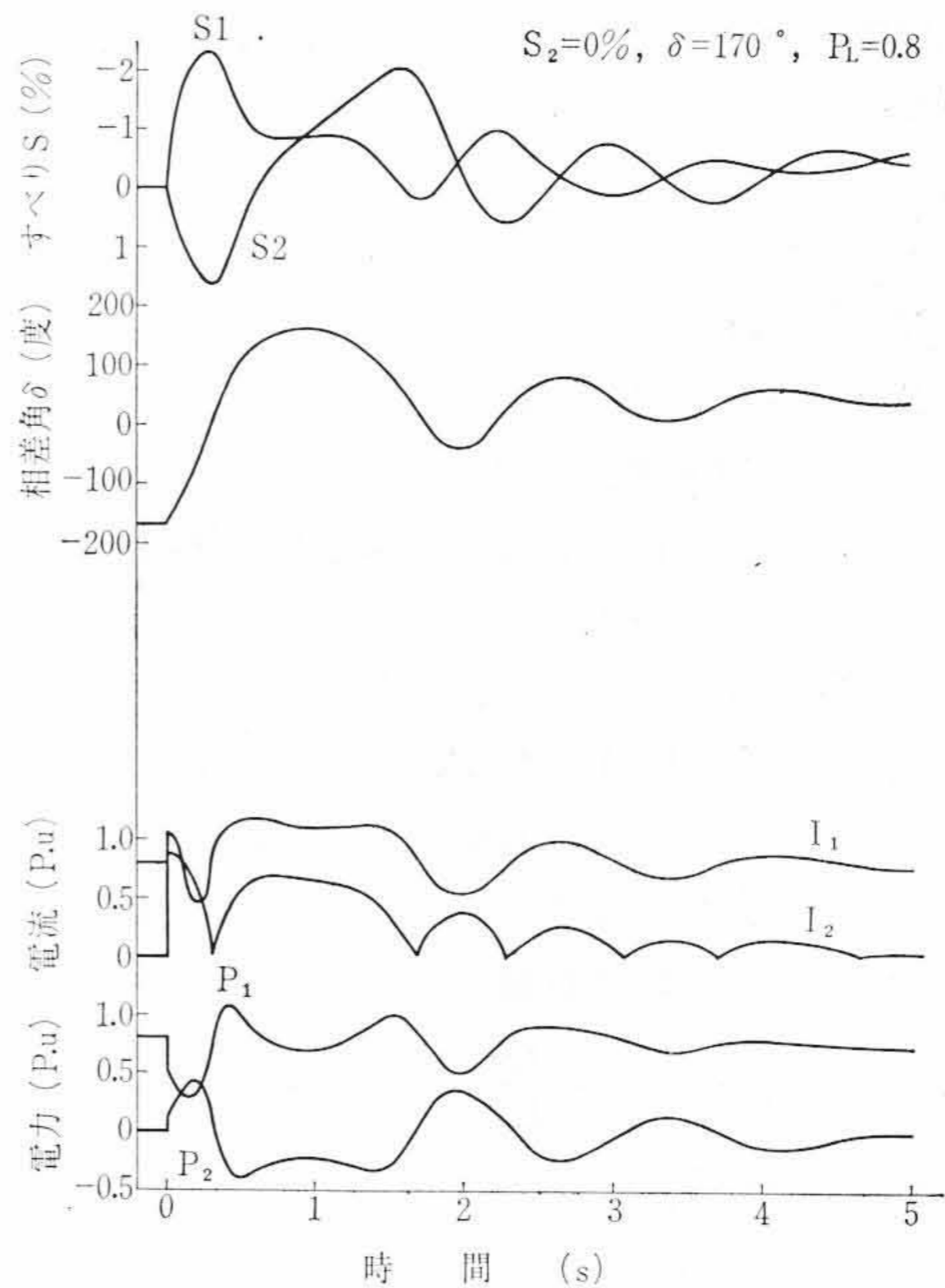
第9図 強制並列時の計算例(3)

次に2号機のすべりが2%、位相角170度で並列した第9図では、2号機の速度は振動的に増加しつつ同期化していくことがすべり s_2 の曲線から判断される。

相差角 δ は0度に収れんしており、磁極がすべることなしに同期化したことがわかる。これに対し、2号機のすべり s_2 が-2%の場合は2対極目に同期化するという結果をえている。このように磁極すべりを起こすときは同期化に要する時間は若干増加するが、その影響は比較的少ないので事実上問題ない。

さらに、第10図は1号機が負荷に電力を供給している状態で強制並列を行なった場合である。同図にみられるように、すべり、相差角、電流、電力ともに負荷のない場合に比べ不規則な経過をたどって同期化する。

このほか種々の回路条件について検討した結果、次の諸点を明らかにすることができた。



第10図 強制並列時の計算例(4)

- (1) 抑制リアクトルの値は突入電流、母線電圧降下の許容範囲内で可及的に小さいことが望ましい。
- (2) 強制並列に及ぼす負荷の影響は少なくないので、十分考慮しておく必要がある。
- (3) 強制並列においては他励磁方式より自励磁方式の方が広答が速いので有利である。

4. 強制自動同期方式の実施例

日立製作所ではこのたび日立造船株式会社にて建造のソ連船舶輸入公団納め12,000tディーゼルタンカ5隻の船内主交流発電機用強制自動同期装置を完成納入した。以下にその概要を述べる。

発電機仕様

定格容量	3φ 400 kVA
定格電圧	400 V
周波数	50 c/s
回転数	500 rpm
力率	80%
発電機の並列台数	3台
励磁方式	自励式
駆動原動機	ディーゼル機関

第11図は強制自動同期方式の主回路概略結線図を示し、第12図は強制自動同期装置の内観を示したものである。

発電機を並列運転するには配電盤上の電圧調整器、ならびにガバナ調整器により投入しようとする発電機と母線との電圧差、周波数差をそれぞれある一定値以内に調整し、同期投入用押ボタンを押すことにより位相に無関係にリアクトルを介して発電機を母線に自動接続することができる。交流発電機の突入電流をリアクトルにより一定時限抑制したのちリアクトルを気中遮断器で短絡し主回路から切りはなして同期は完了する。

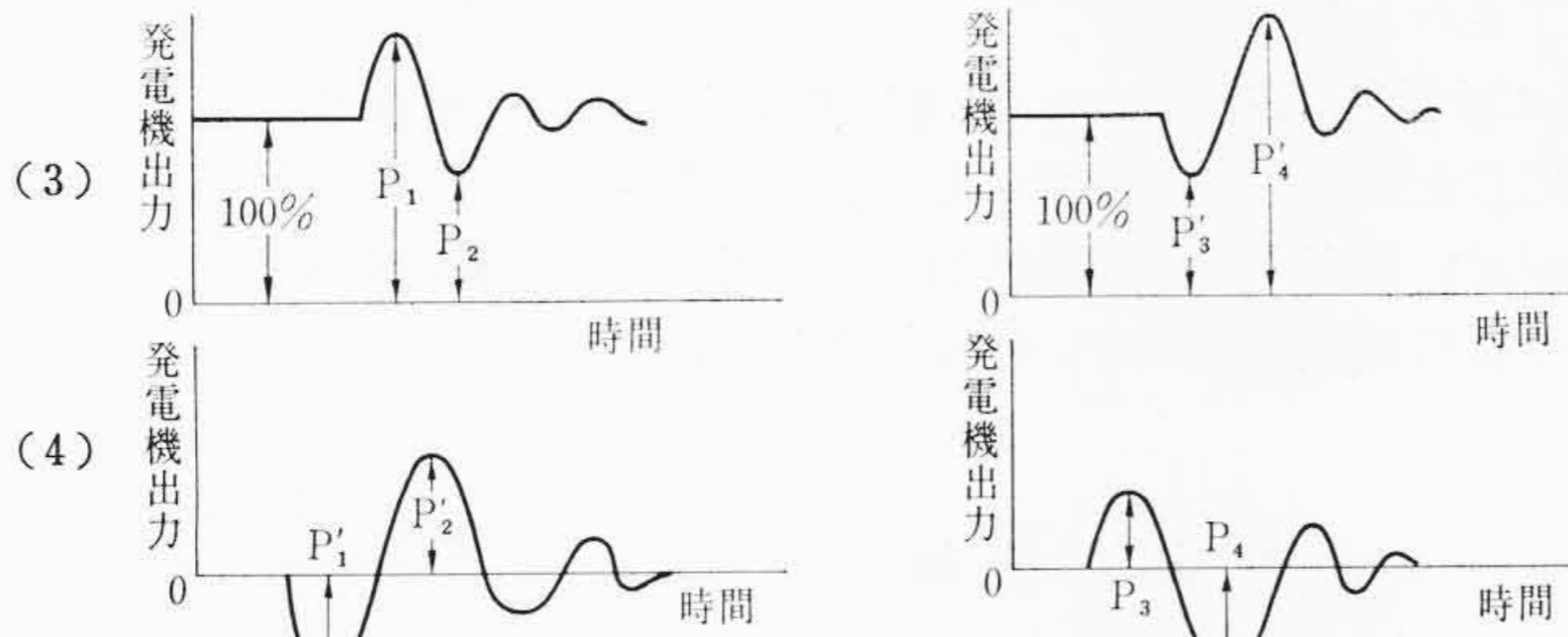
本装置は同期投入を確実に、安全にするため次のような考慮がはらわれている。

- (1) 電圧差が±5%以上で投入すると突入電流が大きく系統のじょう乱が大きいため特殊磁気増幅器形電圧継電器によりこれ以上の電圧差では投入されないようにしている。
- (2) 周波数差が±2%以上で投入すると同期失敗になることがあるので直列共振回路をもった特殊磁気増幅器形周波数継

第1表 船内試験結果一覧表

投入条件 ケース	投入発電機と母線の			投入前母線の 負荷 (%) ⁽¹⁾	並列投入時の瞬時変動				
	周波数差(%)	電圧差(%)	位相差(度)		電源発電機 ⁽²⁾ 瞬時最大電流(%)	投入発電機 瞬時最大電流(%)	電源発電機 ⁽³⁾ 瞬時電力(%)	投入発電機 ⁽⁴⁾ 瞬時電力(%)	母線の瞬時 電圧降下(%)
No.1 (2台並列)	2	5	180	100 (320 kW)	149	80	$p_1=111$ $p_2=57$	$p_1'=-20$ $p_2'=48$	11.7
No.2 (3台並列)	2	5	180	200 (640 kW)	100	80	$p_1=109$ $p_2=79$	$p_1'=-23$ $p_2'=44$	8.9
No.3 (2台並列)	-2	-5	180	100 (320 kW)	146	87	$p_3=95$ $p_4=123$	$p_3'=27$ $p_4'=-43$	14.7
No.4 (3台並列)	-2	-5	180	200 (640 kW)	123	80	$p_3=83$ $p_4=120$	$p_3'=29$ $p_4'=-48$	9.4

注：(1) 負荷率は95%
 (2) 2台並列は已投入の発電機の瞬時最大電流
 3台並列は已投入発電機の中の1台の発電機の瞬時最大電流

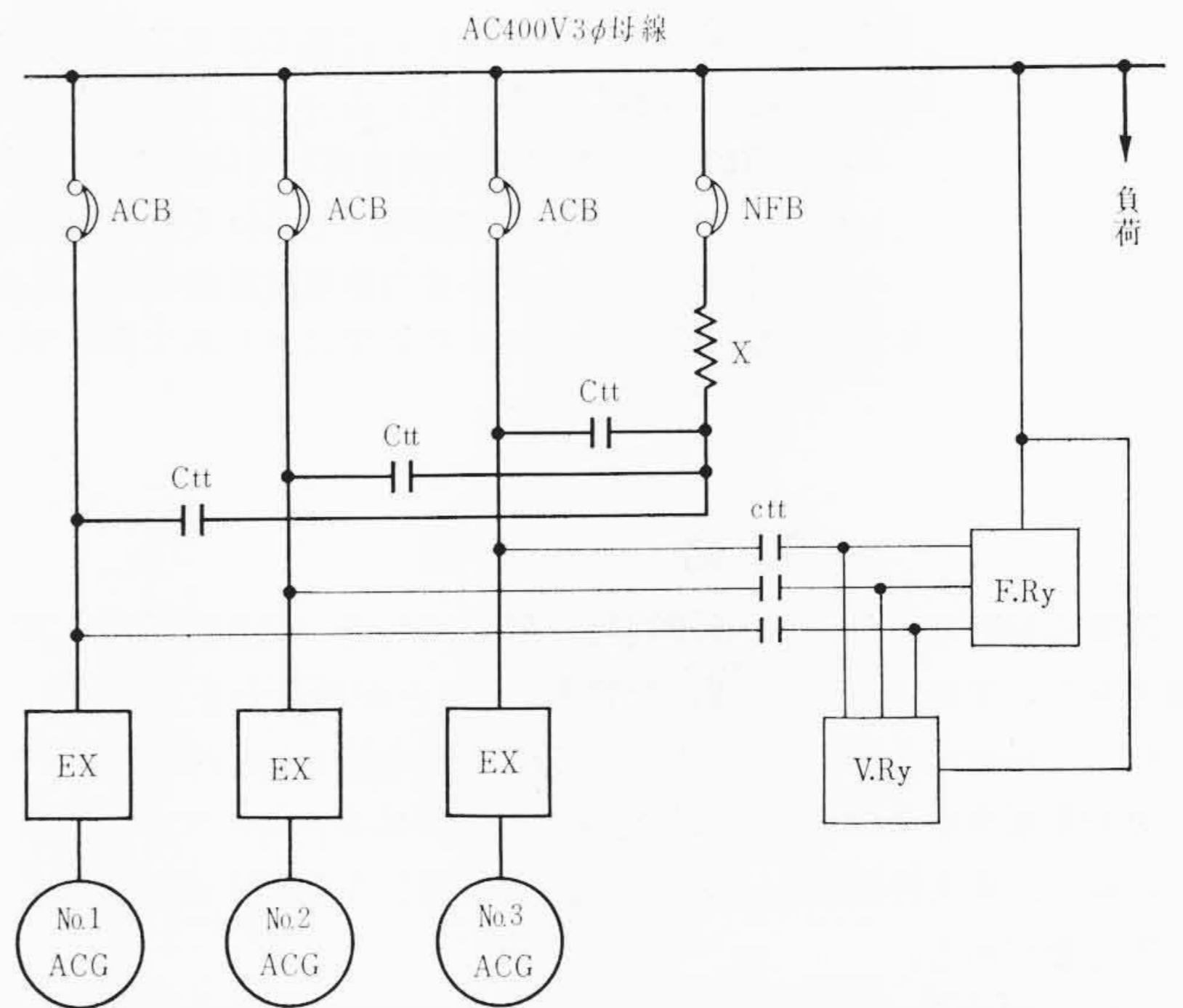


電器によりこれ以上の周波数差では投入されないようにしている。

- (3) なんらかの原因によりリアクトルに一定時間以上、同期化電流が流れた場合は限時継電器によりリアクトルを主回路から切りはなし、焼損保護をしている。
- (4) 母線の負荷変動がひん繁でかつ大きい場合は、交流発電機と母線との電圧差、周波数差が大きく変動するので、これらが一定値以内で、一定時間継続した場合のみ同期投入されるようインターロックし、投入失敗の機会を少なくしている。

第1表は船内での試験結果の一例で、抑制リアクトルが192.5%において、突入電流は負荷運転中の1号機において150%以下、投入側の2号機で100%以下であり、母線電圧のインパクト降下は15%以内である。なお同表で3台並列とは1、3号機のおおのが負荷運転中に2号機を並列に入れた場合で、インパクト降下は10%以下である。

第13図は交流発電機2台並列運転中、1台を強制同期投入したときのオシログラムの例を示したものである。交流発電機と母線電



ACB: 気中遮断器 F.Ry: 特殊磁気増幅器形周波数継電器
 ACG: 交流発電機 NFB: 埋込遮断器
 Ctt: 電磁接触器 V.Ry: 特殊磁気増幅器形電圧継電器
 EX: 自励式励磁装置 X: 抑制リアクトル

第11図 強制自動同期方式主回路概略結線図

圧との電圧差、周波数差および母線負荷を種々変えて試験した結果によると、電圧差の変動に対しては発電機の突入電流はあまり変わらず、周波数差の変動に対しては同期化の過程は大きな影響を受ける。また、母線の電力じょう乱量は母線負荷の小さいときのほうが大きくでている。正常な同期投入が行なわれたときは、発電機の突入電流は100~150%で、3~5秒で同期化が完了している。

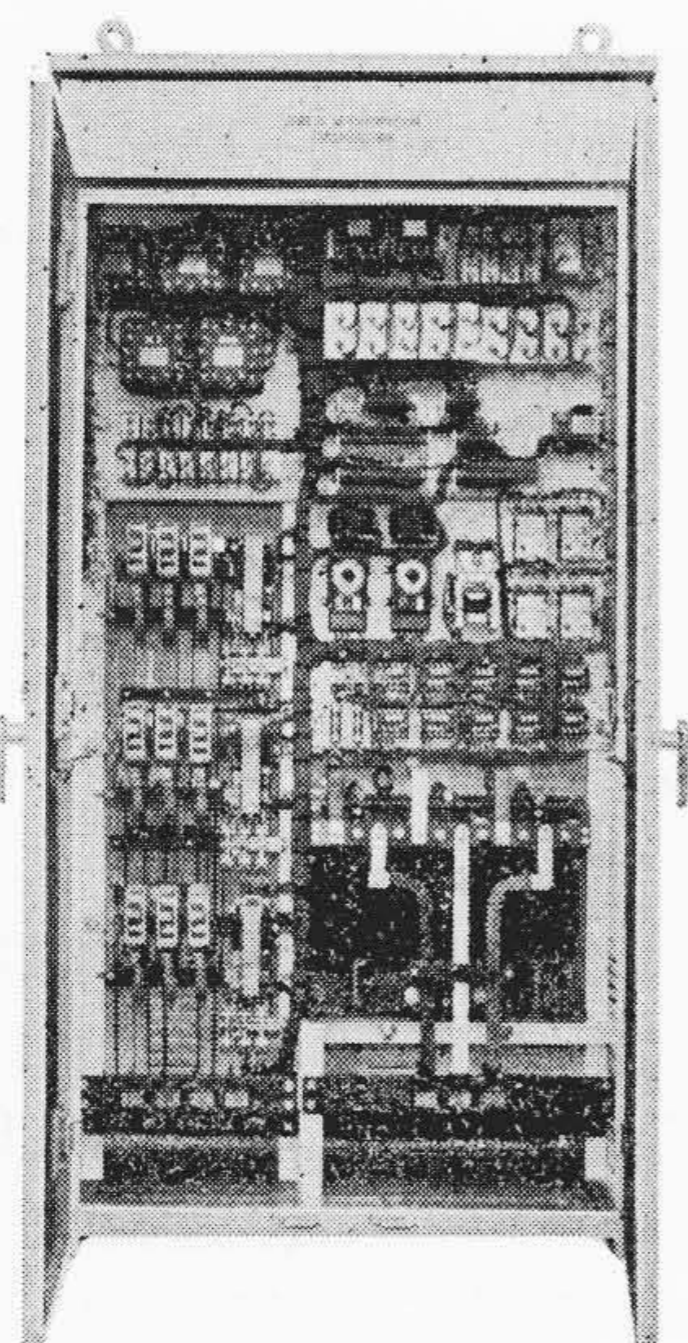
5. 結 言

強制自動同期方式の理論的解析と実施例について述べたが、本方式は手動同期方式と完全自動同期方式の中間を行く簡単で経済的な自動同期方式として、今後各方面で自励交流発電機と組み合わせ使用されるものと信ずる。本論文がこの種計画に各方面で利用されれば筆者らの幸いとするとところである。

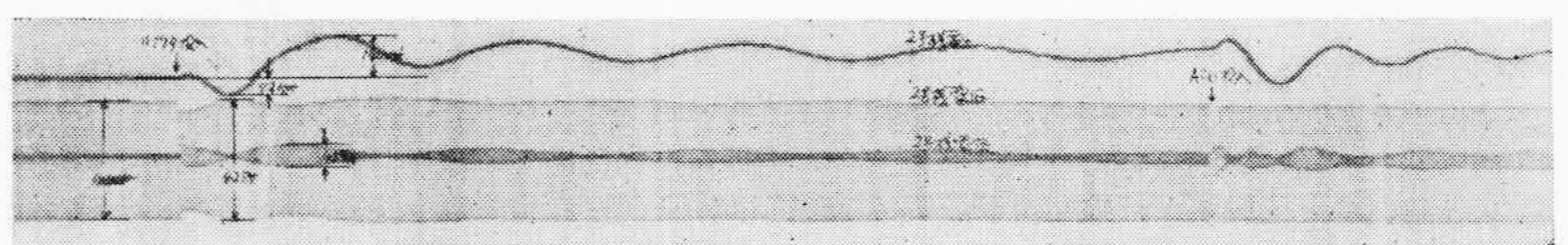
終わりに日立造船株式会社および日立製作所関係各位より多大のご指導をいただいたことを深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 高林, 前沢: 昭36電気学会東京支部大会 201



第12図 強制自動同期装置内観



第13図 発電機の強制同期投入のオシログラムの一例