

磁気移相器制御サイリスタ増幅器を用いた 超速応励磁装置

High Initial Response Excitation System Using Magnetically Controlled Thyristor Amplifier

最近、遠隔地に大形発電所を建設し、長距離大容量送電を行なうことが計画されているが、それには系統の安定度確保のため極めて速い応答速度と高い頂上電圧をもつ発電機励磁装置が必要である。このような装置には、交流励磁機を設けこれを電源としてサイリスタ装置により発電機の励磁電圧を直接制御する直結交流励磁機サイリスタ励磁方式が最も優れていると考えられるが、交流励磁機の端子電圧が著しくひずむため安定な制御が困難であるという問題があった。そこで、波形ひずみの影響を受けにくい磁気移相器制御のサイリスタ増幅器を主体とした交流発電機励磁装置を開発し、東京電力株式会社鶴見発電所で試験を行なった結果、優れた応答と安定性を示し実用化の見通しを得た。

齊藤 修* Saitô Osamu
松尾光昭** Matsuo Mitsuaki
齊藤国夫*** Saitô Kunio
木脇久勝*** Kiwaki Hisakatsu
北村 哲**** Kitamura Satoshi

1 緒 言

最近、都市近郊での発電所の建設が困難になってきたため、遠隔地に大形発電所を建設し長距離大容量送電を行なうことが計画されている。従来、大容量交流発電機の電圧制御系では、励磁電圧の応答速度が一般に0.8秒程度であるが、東京電力株式会社で現在計画中の1,000万kW級隔地発電所では、送電線の長さが200kmにも達するので系統の安定度確保のため、応答速度を0.06秒以内にし頂上電圧も1,200V程度にする必要がある。

そこで東京電力株式会社と日立製作所は共同でこの方式の開発を目標として検討を進め、磁気移相器制御のサイリスタ増幅器を主体とした、超速応励磁装置を開発した。ここでは、この検討結果について述べる。

2 超速応励磁装置の計画

2.1 超速応励磁装置

いま図1(a)のような送電系統を考える。このときの発電機と負荷の電動機の公称誘起電圧間の相角度対発電機出力の関係をみると、最初2回線で送電している場合は同図(b)のAの曲線と P_0 で示した負荷の電力との交点に対応した相角度 δ_0 で送電されている。このとき1回線に短絡故障が生ずると、発電機に大電流が流れ電機子反作用によって出力は低下し、Bの曲線のようになる。そして発電機からの電氣的出力が低下するため発電機は加速され、相角度は δ_0 から δ_1 に向かって増大して行き、慣性によって行き過ぎを生じ δ_1 を中心に振動しながら収束する。しかし相角度の移動が大きく、 δ' を超えるようなことがあると発電機の出力は相角度の増加とともに逆に減少するので相角度はますます増大し、 δ_1 に復帰することができず遂には脱調して系統の安定が保てなくなる。

このように短絡故障時などの過渡安定度から送電容量が制限される傾向は、送電線が長くなるほどインピーダンスが増し、初期の δ_0 が大きくなるので顕著に現われてくる。

ところで、故障発生後直ちに発電機の界磁を強力に励磁すると故障後の発電機出力の曲線は図1(b)のCの曲線のように

なるので相角度の移動が小さくて済み、安定度が向上し送電容量を大きくすることができる。

このように発電機界磁の励磁を制御して、過渡安定度面からの送電容量が低下するのを防ぐためには、ユニット容量1,000MW級の発電機の場合、発電機には励磁電圧の応答速度が0.06秒以内で頂上電圧も1,200V程度にとった超速応励磁装置が必要になるが、国内ではまだ実施された例がない。そこで、今回このような装置を試作し試験することになったものである。

2.2 各種励磁方式

ところで、この超速応励磁方式には図2に示したような幾つかの方式が考えられる。同図(a)のコミュテータレス励磁方式では、発電機の電圧を検出して基準値と比較しサイリスタを制御して交流励磁機の界磁を調整する。発電機の界磁電流は交流励磁機の出力をシリコン整流器で整流して与えられる。この方式ではサイリスタは、交流励磁機の界磁を制御するのに用いられ、発電機の界磁は時定数の大きい交流励磁機を介して制御されるので、応答速度を速めることが困難である。

同図(b)のサイリスタ分巻自励方式では、発電機の界磁を発電機自身の出力から変圧器を介してサイリスタで制御しているので、速い応答速度が得られる。しかし、送電線が故障して発電機の端子電圧が著しく低下した場合には、強力な励磁が必要であるにもかかわらず、励磁が困難になる。

ところで、交流励磁機の出力を直接サイリスタで制御して発電機の界磁に与える同図(c)の直結交流励磁機サイリスタ励磁方式では、速い応答速度が得られ、しかも発電機の端子電圧が低下した場合にも励磁が可能である。そこで、我々はこの(c)方式を採用することにした。この交流励磁機とサイリスタを組み合わせた励磁装置は、アメリカG.E.社では既に製品化している¹⁾が、国内では初めてのものである。

2.3 直結交流励磁機サイリスタ励磁方式

この方式を更に詳細なブロック図で示すと、図3のようになる。すなわち、発電機の電圧と電流を検出して横流補償し

* 東京電力株式会社福島第一原子力発電所 ** 東京電力株式会社火力部 *** 日立製作所日立研究所 **** 日立製作所大みか工場

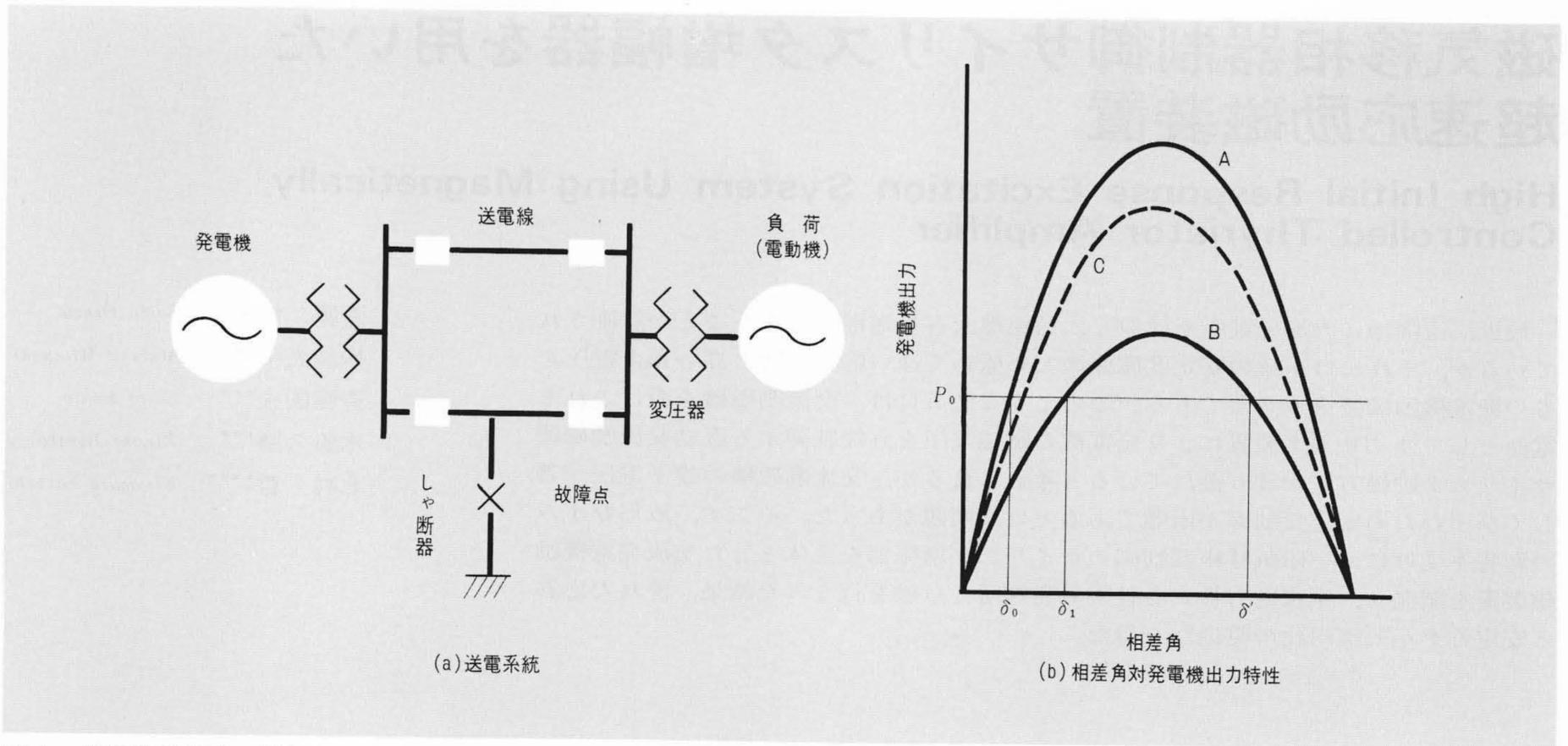
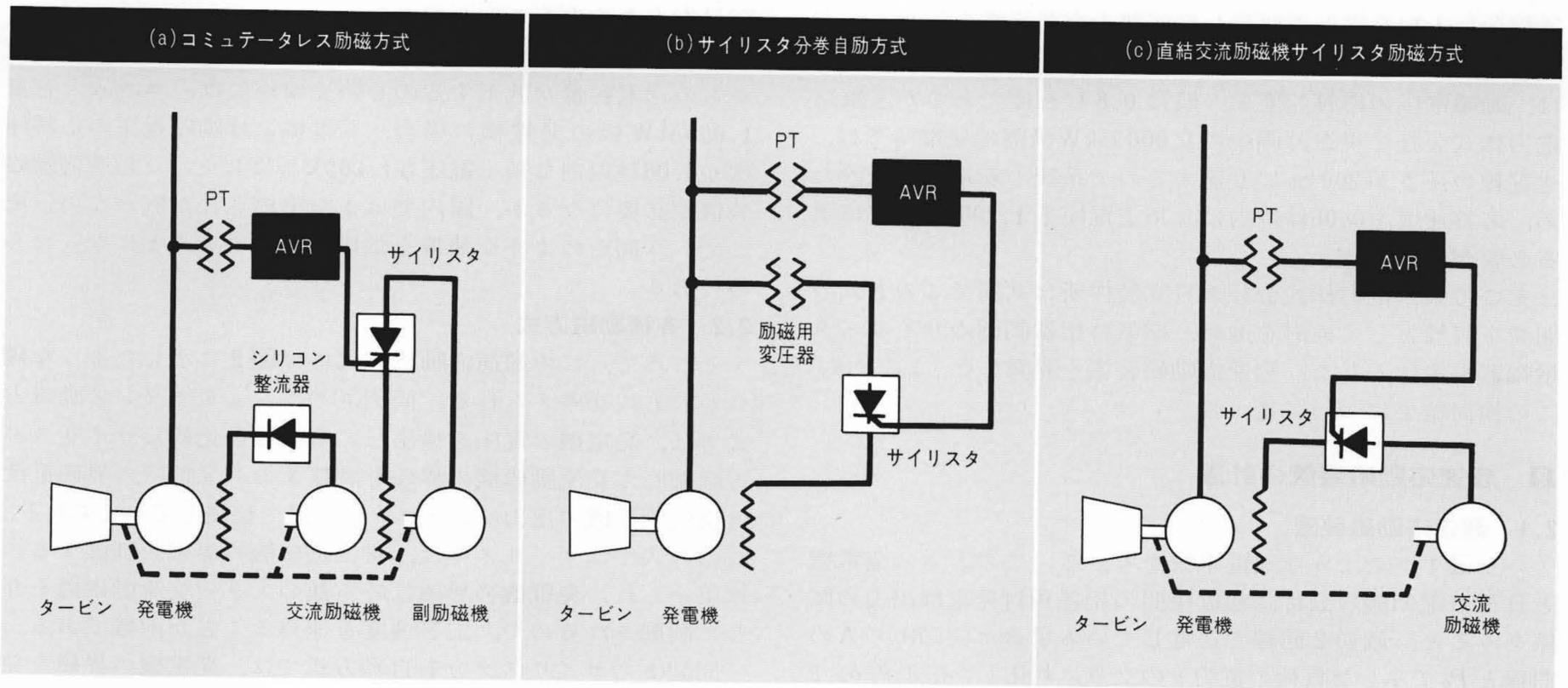


図1 送電線故障時の発電機出力 超速応励磁装置を用いると、故障時の相対角の移動が小さくなり、安定度が向上する。



注：AVR=自動電圧調整器 PT=計器用変圧器

図2 同期発電機のサイリスタ式励磁装置 超速応励磁装置には(c)の方式が最も適していると考えられる。

電圧偏差を検出し、これを増幅して制御信号として移相器に与える。移相器はこの制御信号に応じて移相されたパルスをつくり、パルス増幅器でこれをゲートパルスに増幅してサイリスタを制御して発電機の界磁を調整する。このほか、低励磁制限装置、電力安定化装置などを設けている。

ところで、交流励磁機の端子電圧はサイリスタの転流により著しく波形が乱れる。すなわち、サイリスタ装置の出力の容量に比べ交流励磁機の容量を大きくするとこの波形ひずみは小さくなるが、このようにすると励磁機が大形化し値段も高くなり望ましくない。そこで励磁機はできるだけ小さくする必要があり、このような条件でサイリスタを位相制御するとサイリスタの転流で著しく波形が乱れるのである。

この交流励磁機の端子電圧波形は、図4に示すように計画した。定格界磁電圧のときには、同図(a)に示した程度のひずみであるが、頂上電圧出力時には同図(b)に示したように波形が乱れる。

したがって、サイリスタゲート制御装置にこのように乱れた波形のものをそのまま用いると、ゲート制御装置がこの波形の乱れの影響を受け、更に波形の乱れを助長し安定な運転ができなくなることがある²⁾。

したがって、本装置を実現する上で最も問題になるのは、交流励磁機の波形ひずみの影響を受けず、しかも応答速度が速くかつ信頼度の高い制御装置を得ることである。そこで、このような装置の開発を目標に特にサイリスタ増幅器のゲー

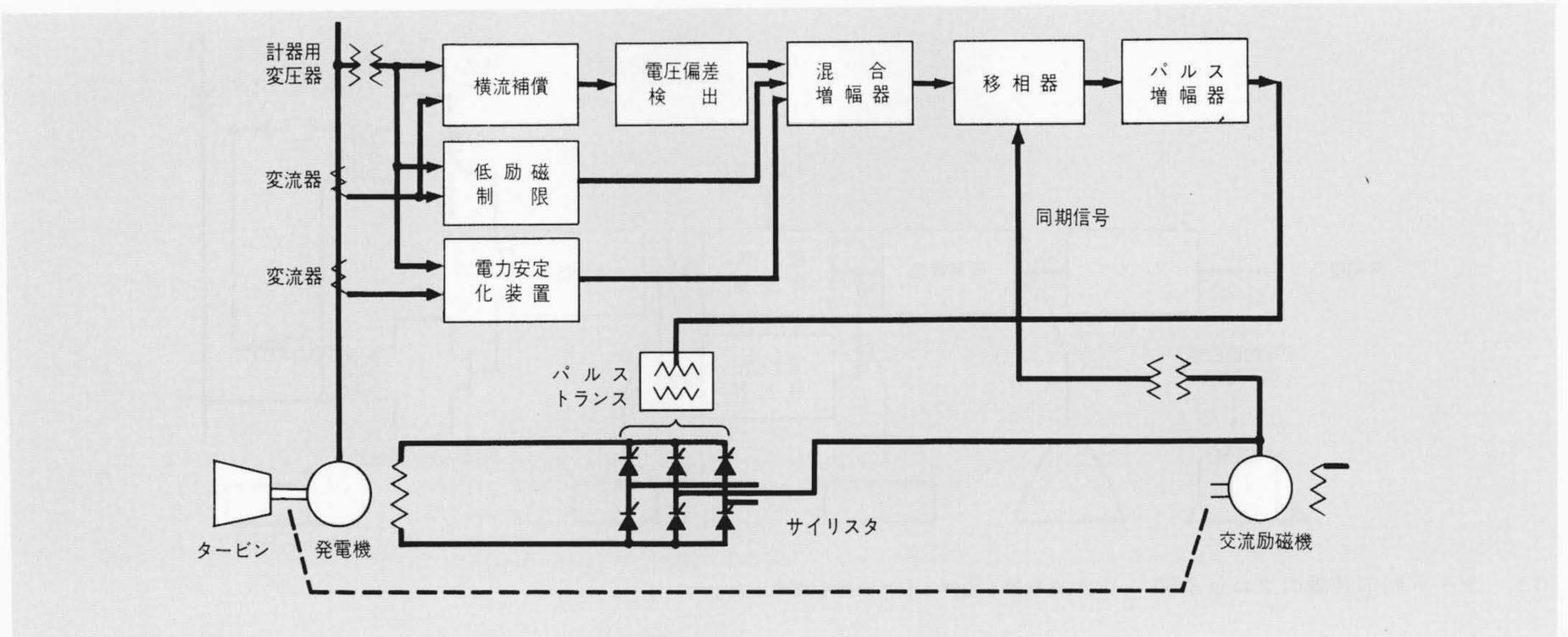


図3 直結交流励磁機サイリスタ増幅器方式の自動電圧制御系の同期信号とするが、サイリスタの転流により著しく波形がひずむ。 交流励磁機の端子電圧を移相器

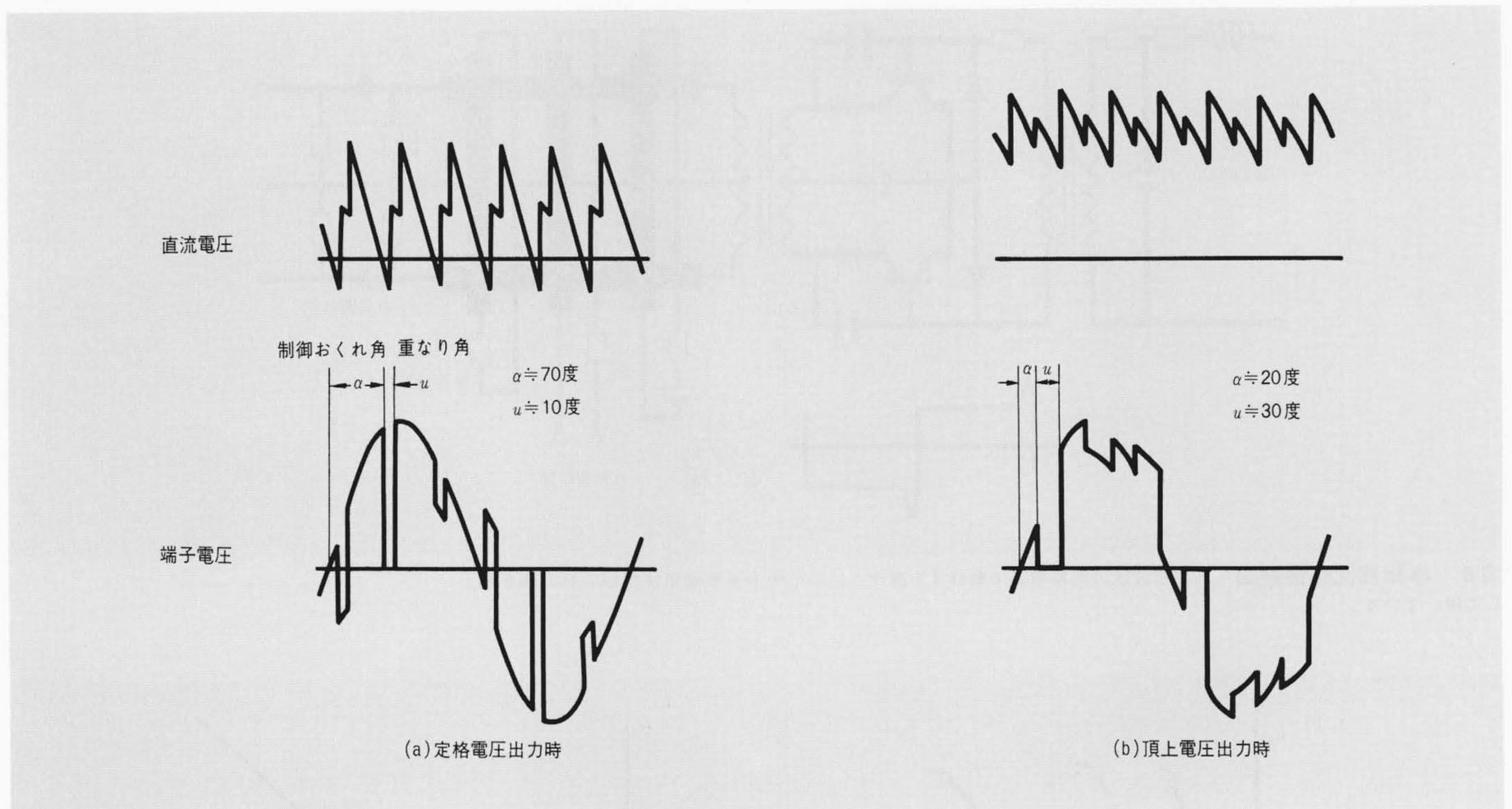


図4 交流励磁機の端子電圧波形 波形ひずみはこの程度になるよう計画した。

ト制御装置を検討した。

3 サイリスタ ゲート制御装置の開発

3.1 基本構成

上述の目的を満足するものとして図5に示す構成のゲート制御装置を立案した。最も重要な移相器には回路が簡単で信頼性の点でも優れている平衡半波形の磁気移相器を採用した。磁気移相器はもともと波形ひずみの影響を受けにくいものであるが、電源の波形ひずみが図4(b)に示した程度になると問題である。そこで、移相範囲を広くすることも考えて同期電源回路を設けることにした。このようにすると、フィルタは同期電源回路に同期信号を与える程度の簡単なものでよ

いことになる。

つまり、交流励磁機の端子電圧をフィルタを通して正弦波にし同期インバータで方形波に変換する。そしてこれを電源として磁気移相器で移相された波形を得るものである。

固定移相器は最大の制御遅れ角に対応したいわゆるエンドパルスを確認するためのものである。移相器の出力はトランジスタ回路で波形整形した後、ゲートパルス増幅器に与えられる。ゲートパルス増幅器はサイリスタに立上りが急峻でかつ広幅のゲートパルスを与えるよう、パルス変圧器を二つに分けサイリスタスイッチを用いた立上りの速い狭幅パルスとトランジスタスイッチを用いた広幅パルスを合成するようにした。

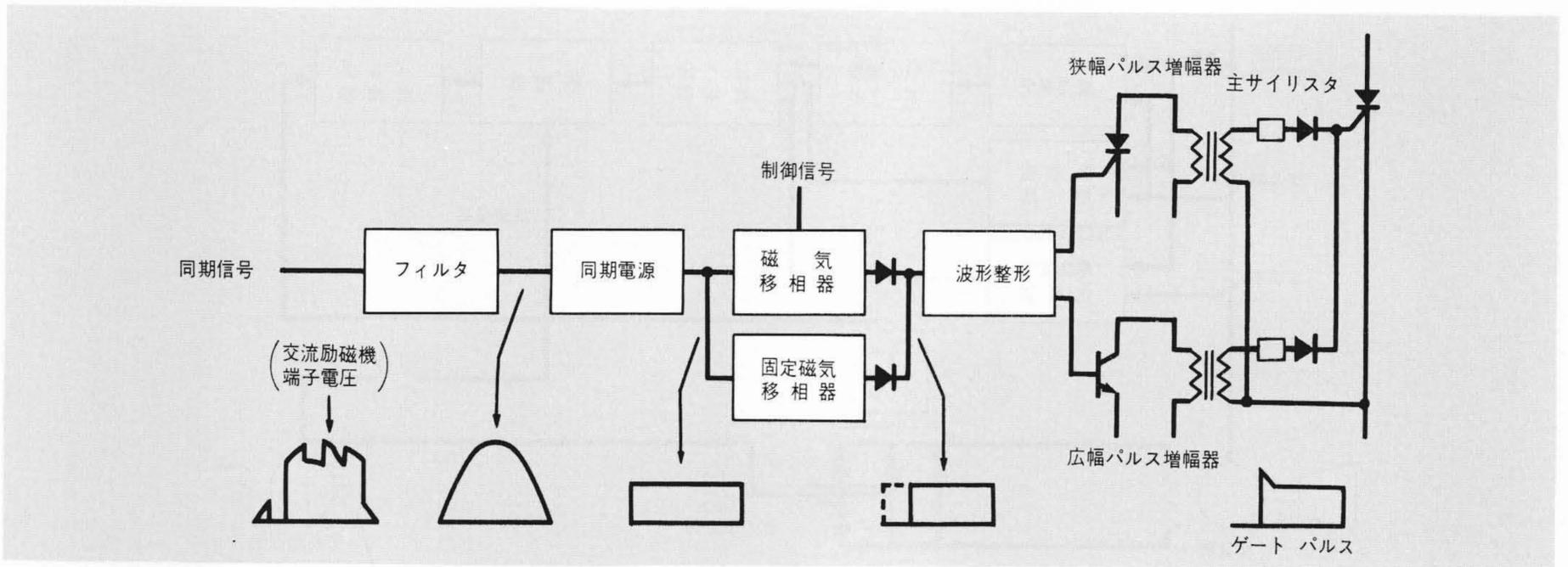


図5 ゲート制御装置のブロック図 磁気移相器を主体とした装置を立案した。

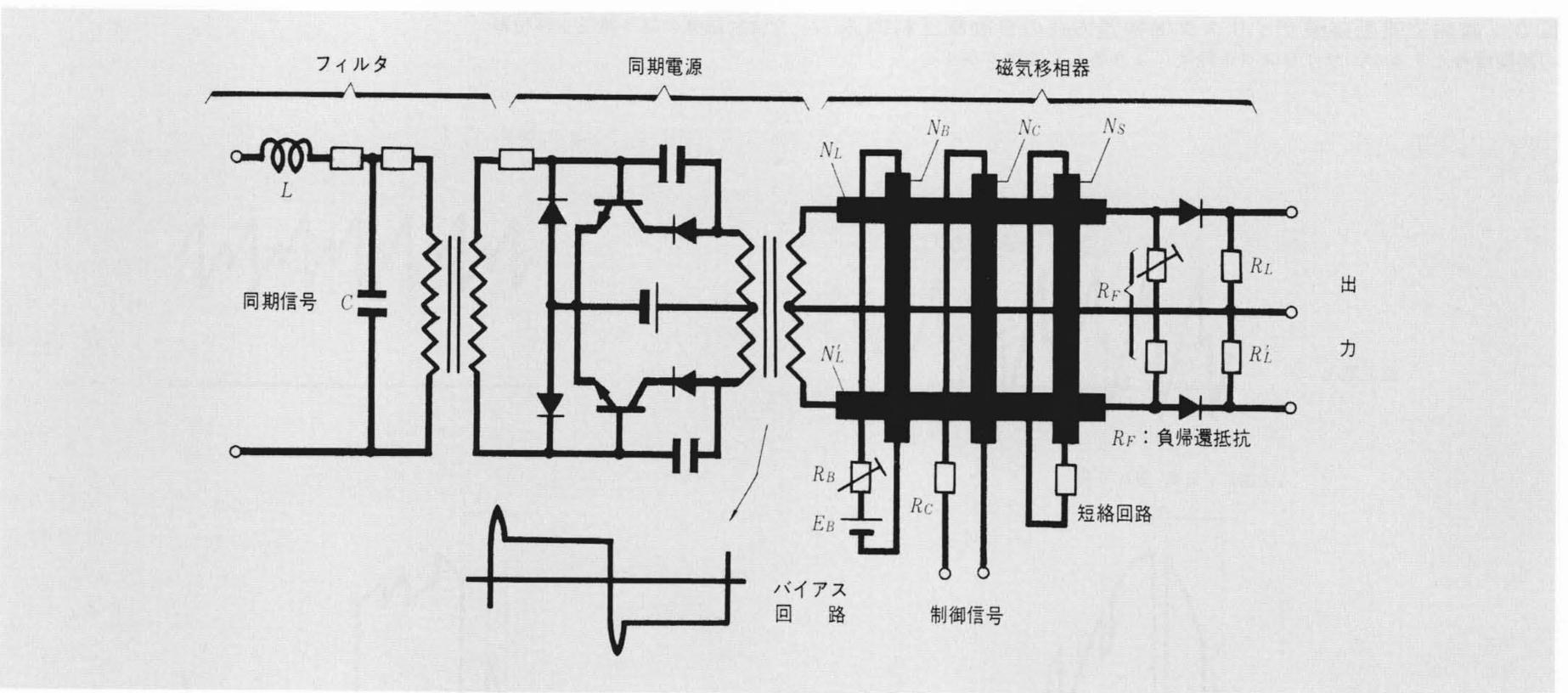


図6 移相器回路接続図 方形波状の同期電源で動作する高ゲインの平衡半波形磁気移相器に負帰還を施して用いている。

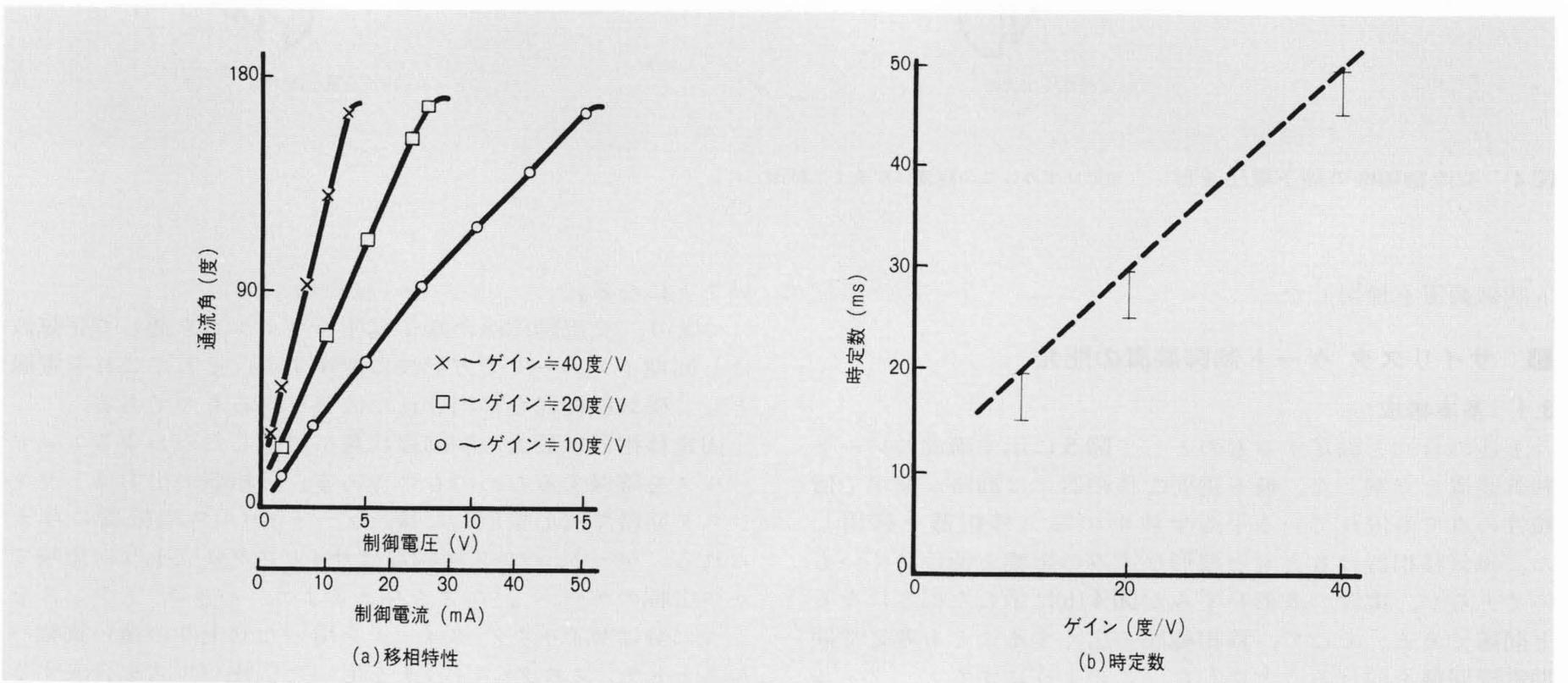


図7 移相器回路の特性 超速応励磁に必要な移相特性, 時定数が得られる。

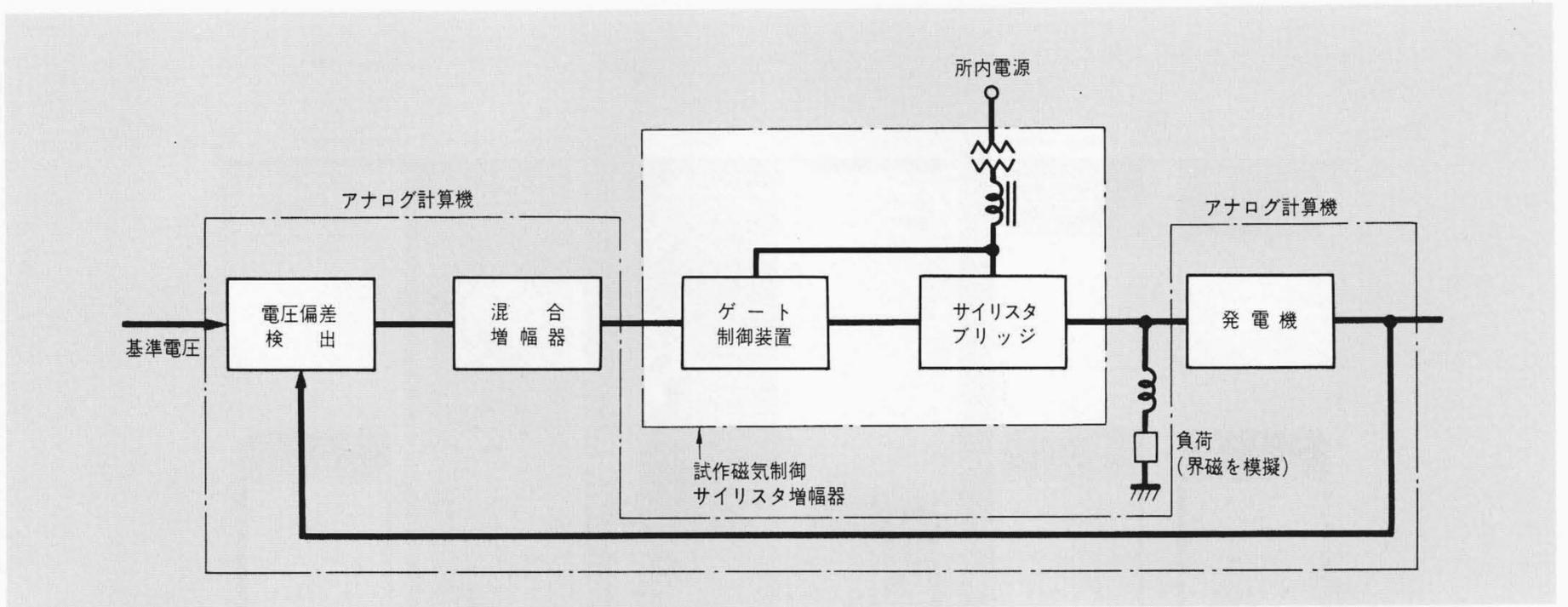


図8 試作装置による予備実験 アナログ計算機と組み合わせ、シミュレーションを行なった。

3.2 移相器回路

このゲート制御装置ではフィルタから磁気移相器までの移相器回路が中心となる。

この部分の接続図は、図6に示すようなものである。フィルタは各種の形式のものを検討し、同図に示したような形式のLCフィルタとした。

次に図3に示した混合増幅器からの制御信号のレベルからみて、磁気移相器には高い感度が必要である。また応答速度を上げるため、スーパーマロイ系であるセンパーマックス鉄心(東北金属工業株式会社製)を使った高利得の平衡半波形の磁気移相器に、負帰還を施して用いた。磁気移相器の鉄心にセンパーマックスを用いると高感度になるが、しかし正弦波

を電源とすると飽和リアクタンスが大きいため、移相範囲が小さくなる。そこで、前述のように方形波を発生する同期電源回路を用い、更にコンデンサを設けることにより方形波の立上りの部分にパルス電圧を重畳するようにしたのである³⁾。

この移相器回路の特性は図7のようになる。移相特性にはバイアス回路は除いてあるが、移相範囲は所要の値を満足し直線性も大体良好でゲインも負帰還抵抗 R_F を変えることで所要の値が得られた。また時定数は磁気移相器の短絡回路抵抗の値と負帰還後のゲインによって変わるが、所要のゲインの範囲で20~50msとなっている。

3.3 予備実験

この磁気制御サイリスタ増幅器を用いた装置で、発電機を励磁した場合の応答を知るため、アナログ計算機で発電機を模擬し試作装置と組み合わせ、シミュレーションを行なった。図8がこの場合のブロック図である。ゲート制御装置とサイリスタブリッジの部分は試作したセットを用いた。発電機は一次遅れ系で近似した。また交流励磁機の波形ひずみの影響については、電源側に適当なインピーダンスを接続してほぼ計画どおりの波形ひずみとした。

実験結果のオシログラムの一例を図9に示す。これは基準電圧を約10%変化させた場合の応答で、界磁電圧は速い立上り時間で高い頂上電圧を出力している。実験の結果、試作した装置は所定の波形ひずみのもとでも良好に動作し、応答速度も所要の値を満足する見通しを得た。

4 現地試験

本方式の交流発電機励磁装置を試作し、工場試験の後、東京電力株式会社鶴見発電所において、昭和48年9月に66MWの4号機と組み合わせ現地試験を行なった。装置を図10に示す。

その結果、交流励磁機の波形ひずみが最大で図11(a)に示したようになる条件でも波形ひずみの影響による問題は全くなく、インディシャル応答試験、周波数応答試験、電力安定化装置試験などの各種の試験を好調に終了した。インディシャル応答試験では、同図(b)に示したように速い応答速度で高い頂上電圧を出力している。また基準電圧の変化量を種々与えた場合にも応答速度は0.06秒以内で、所要の性能の超速応励磁が実現できた。

本装置は、現地試験の後約1箇月系統に接続運転されたが、これも順調に終了した。

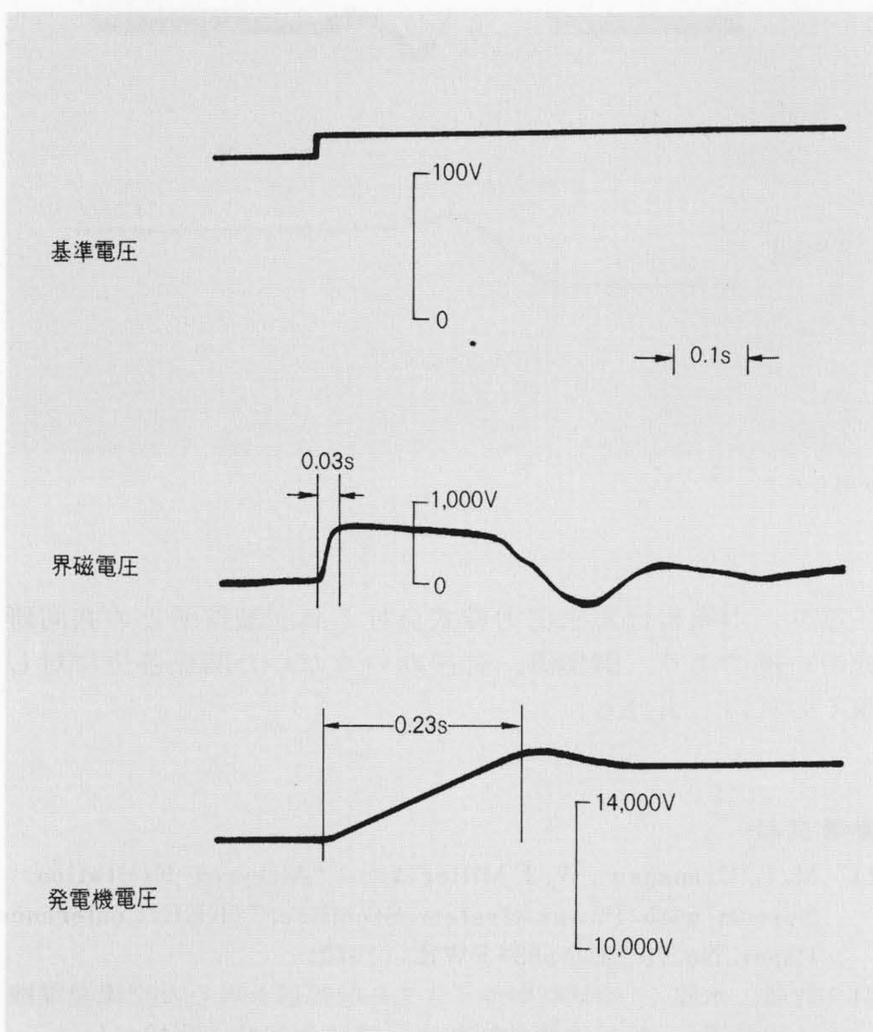


図9 シミュレーション結果の一例 応答速度、頂上電圧など所要の性能を満足している。

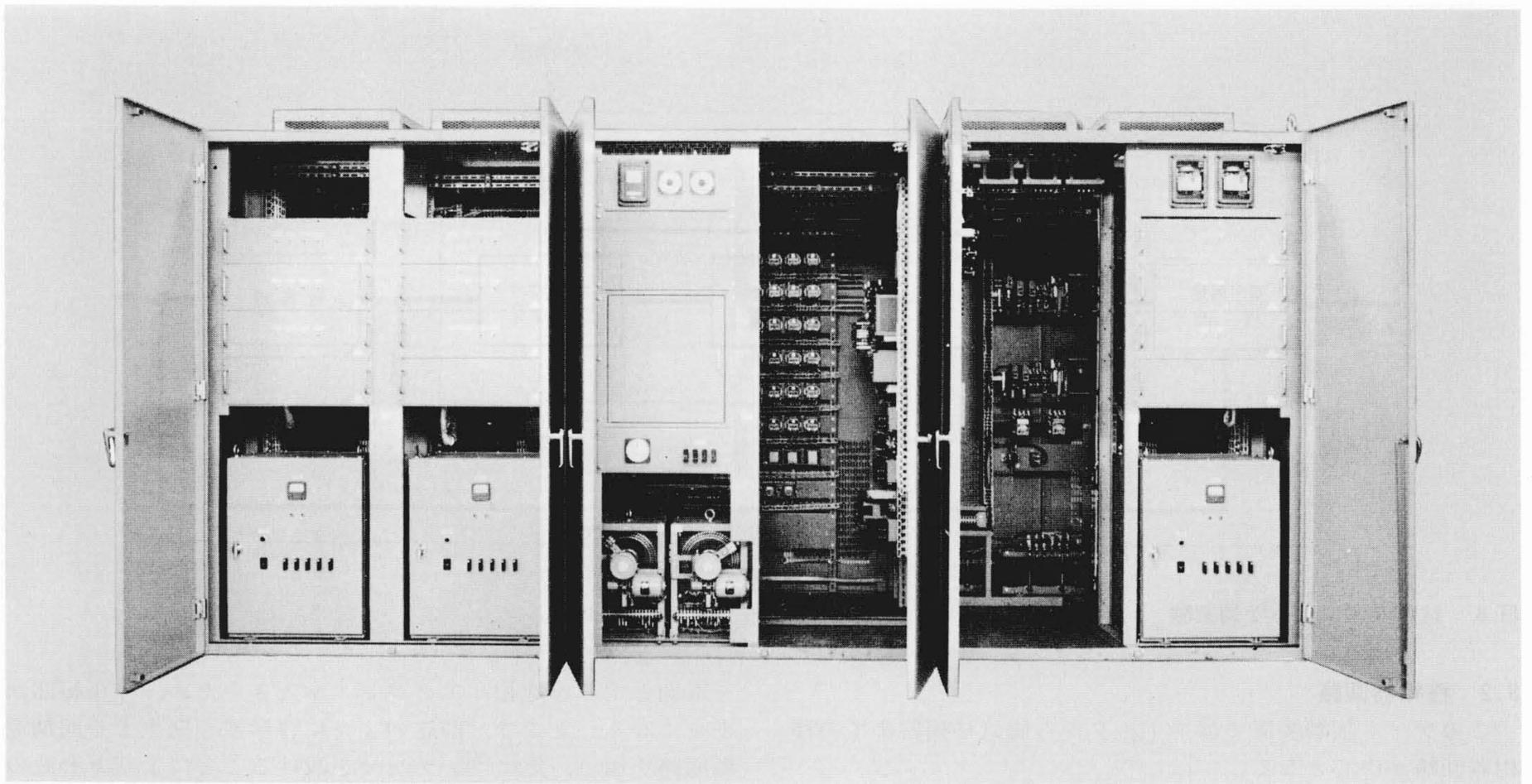


図10 交流発電機励磁装置 AVR及びサイリスタ ゲート制御装置などのキュービクルを示す。

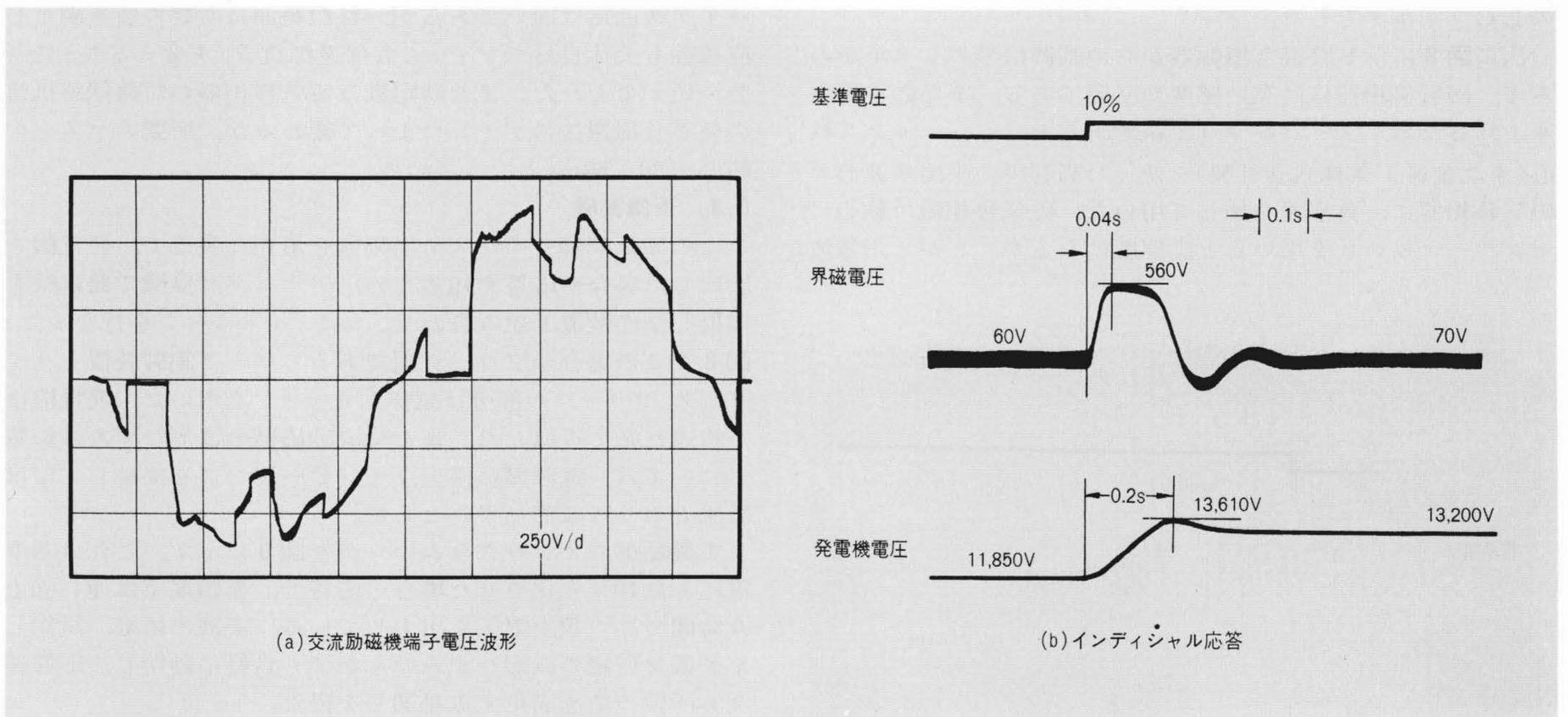


図11 現地試験結果の一例 波形ひずみの下でも良好に動作し、所期の性能が得られた。

5 結 言

以上、磁気制御サイリスタ増幅器を用いた交流発電機超速応励磁装置の開発について述べた。要約すると、

- (1) 東京電力株式会社で計画中の1,000万kW級隔地発電所用の超速応励磁装置を得ることを目標に、交流励磁機の波形ひずみの影響を受けない安定な制御方式を開発した。
- (2) そして試作装置を東京電力株式会社鶴見発電所の66MW交流発電機と組み合わせて現地試験を行なった結果、所要の性能を満足した。

これより、遠隔地の大形火力・原子力発電所の超速応励磁装置にも、本制御方式を適用できる見通しを得た。

なお、本報告は東京電力株式会社と日立製作所との共同研究の一部であり、御指導、御援助いただいた関係各位に対し厚くお礼申しあげる。

参考文献

- 1) M. L. Crenshaw, W. J. Millerほか：“Althyrex Excitation System with Power System Stabilizer” IEEE Conference Paper No. 70 CP 563-PWR (1970)
- 2) 齊藤, 木脇：「磁気制御サイリスタ増幅器を用いた交流発電機励磁装置」, 第17回自動制御連合講演会2011 (昭49-11)
- 3) 木脇, 黒滝ほか：「オーバーシュート付方形波電源による磁気移相器特性の改善」, 昭和49年電気学会全国大会484 (昭49-3)