

# 最近の同期発電機用励磁装置

## Recent Developments in Excitation Equipments for Synchronous Generators

前沢嗣伸\* *Tsugunobu Maczawa*

百地 康\* *Yasushi Momochi*

Recently, as an excitation equipment for large capacity turbine generators the alternator exciter, a combination of AC generator and silicon rectifier, is taking the place of direct current exciter, and for the purpose of regulating this alternator exciter a thyristor type automatic voltage regulator has been developed.

Secondly, the static excitation system using thyristor converter is a control device which gets its exciting power from the output terminal of a synchronous machine for which it is intended to excite and control the field coil of the synchronous machine. It features high rate of exciting voltage response control which cannot be realized by ordinary rotating exciters, contributing to the transient stability of the synchronous machine and simplification of maintenance care.

The silicon rectifier and the thyristor converter must be designed with full consideration for over-voltage and over-current including generator field induced voltage and current which occur in the transient period of synchronous machine operation.

The power system stabilizer is a new type of additional control device which improves the damping force of a power line system by feeding the exciting control system with power variation signals through lead-lag compensating circuit, and appreciably improves transmission power stability by withholding power swing.

### 1 緒 言

最近の同期機励磁装置を総括的にみた場合、特徴的傾向として次の2点をあげることができる。第一は励磁装置の半導体整流器の適用をはじめとする電子回路化であり、第二は電力系統の安定運転保持に関連した励磁制御の目的の多様化である。いわゆる整流器励磁装置という名で総称されるシリコン整流器やサイリスタを使用した励磁装置は半導体素子の大容量化、高信頼化によってはじめて実現したものであるが、従来の直流励磁機における問題点を解決することができ、さらに装置寸法の縮小、保守の容易さなどの利点によって広く採用されるようになった。

タービン発電機用の高速大容量機には交流発電機とシリコン整流器とによるいわゆる交流励磁機が適用され、また励磁系の特性改善を目的とし、整流装置の特長を積極的に活用したものととしてサイリスタ静止励磁装置が開発された。サイリスタ励磁装置は、その他の励磁方式によってはとうていなし得ない超高速励磁制御を実現することができ、従来、同期機の過渡安定度改善などの目的で追求されてきた励磁制御の高速化は、ほぼその限界に達したといえることができる。

多様化した励磁制御のうち特に電力系統安定化装置<sup>1)2)</sup>は、同期機の制動力を増加し、安定度を改善するという新しい制御機能を励磁系に加えるものとして注目されている。この安定化装置と超高速励磁装置によって同期機および系統の安定化に及ぼす励磁系の効果を最も有効に利用することができ、発電機および系統の電力安定運転限界を高めることに寄与するところが大きい。

以下に日立製作所における大容量同期発電機用励磁装置の現状について述べてユーザーの参考に供したい。

### 2 交流励磁機

交流励磁機は励磁電源を発電機軸直結の励磁用交流発電機の出力を整流して得るものであり、整流装置を別置するコミュテータレス方式と回転整流器を本体に組み込むブラシレス方式とに大別される。これら交流励磁機は主として火力および原子力発電用の高速大容量発電機に用いられ、日立製作所ではこれまでに発電機20台、総出力6,823MVAにコミュテータレス方式を適用し、さらに9台、総出力3,992MVA用の装置を製作中である。最大容量機は発電機出力670MVA、励磁機定格2,800kWのものである。

#### 2.1 動作原理

コミュテータレス方式の制御回路は図1に示すとおりである。この方式においては自動電圧調整装置(以下、AVRと略す)の出力によって交流励磁機の界磁を制御し、交流励磁機の出力は三相全波整流されて発電機の界磁に与えられる。この交流励磁機の制御電源は発電機軸直結の高周波交流副励磁機(以下、HFGと略す)より供給するものとし、HFGの出力電圧は従来使用実績の多い磁気増幅器を用いた分巻自励装置により一定に制御されている。

発電機の励磁制御系は、自動と手動の二重系化することにより制御装置の信頼度を高めている。自動系は電圧検出回路により発電機電圧と設定電圧との偏差を検出し、これを磁気

\*日立製作所大みか工場



### 3 サイリスタ静止励磁装置

サイリスタ静止励磁装置は、サイリスタの出力で直接発電機の界磁を制御するもので、通常励磁電源を同期発電機の端子より採るが、必要に応じ所内母線より採ることも可能である。また専用の励磁電源発電機を設けることも考えられる。日立製作所ではサイリスタ分巻自励方式の励磁装置を昭和42年に産業用自家発電設備としてその1号機を運転開始して以来、これまでに発電機120台、総出力4,200MVAに適用し、さらに現在、24台、2,600MVA用の装置を製作中である。本方式は主として水力機用、自家発電向けの中小容量火力機およびガスタービン発電機用として製作中であるが、輸出向け大容量火力発電機用にも採用され、最大容量のものは発電機出力320MVA、励磁装置出力720kWである。

#### 3.1 動作原理

大容量発電機用サイリスタ分巻自励装置の回路は、図4に示すとおりである。この方式では励磁電源を主機端子より励磁電源変圧器を介して採り出し、サイリスタによって制御して発電機界磁を励磁している。励磁用サイリスタは三相混合ブリッジまたは三相純ブリッジが用いられ、一般に特に高

い励磁系頂上電圧を要求される場合にインバータ制御の可能な三相純ブリッジが用いられている。

励磁装置の制御系には自動系と手動系を設け、それぞれのゲート制御装置によりサイリスタを制御することにより制御系の信頼性を高めている。自動系は、電圧検出装置により発電機端子電圧を電圧設定器と比較し偏差信号を検出し、演算増幅器により増幅し、ゲート位相制御装置（以下、APPSと略す）に与える。この信号はAPPSにより位相制御されたパルス信号に変換され、パルスアンプを介してサイリスタのゲートを制御する。一方、手動系は、界磁電流をサイリスタの交流入力側より採り出し手動用演算増幅器およびAPPSを介して制御する。これら自動、手動いずれの制御回路も電子化され、その制御電源は励磁電源変圧器の二次側および所内バッテリーから採ることにより二重化し信頼度を高めている。

本制御装置に用いられるAPPSは、発電機始動時および負荷しゃ断時の電圧ならびに周波数変動を考慮しているので発電機電圧、周波数ともこれらの状態で十分励磁制御が可能であり、主変圧器高圧側事故時などにも動作可能である。

発電機始動時の初励磁は、所内バッテリーより与えるもの

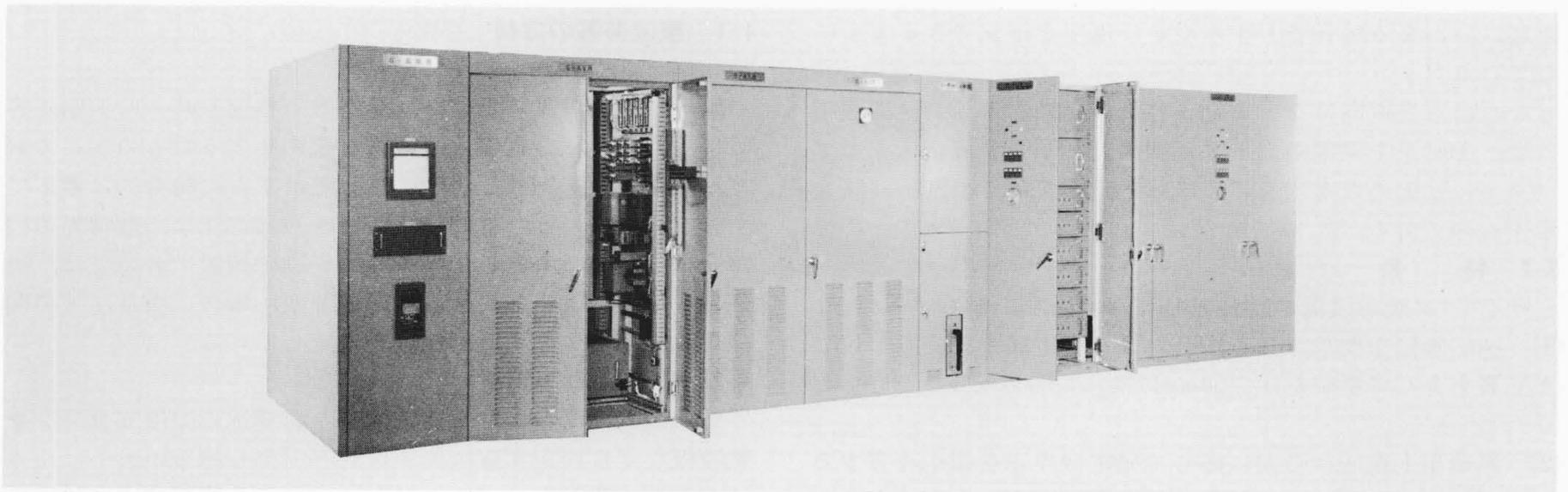


図3 励磁制御装置 コミュテータレス方式の制御キュービクルを示す。正面向かって左より変換器、AVR、界磁しゃ断器、シリコン整流器の各キュービクルより構成されている。

Fig. 3 Control Cubicles of A C Exciter System

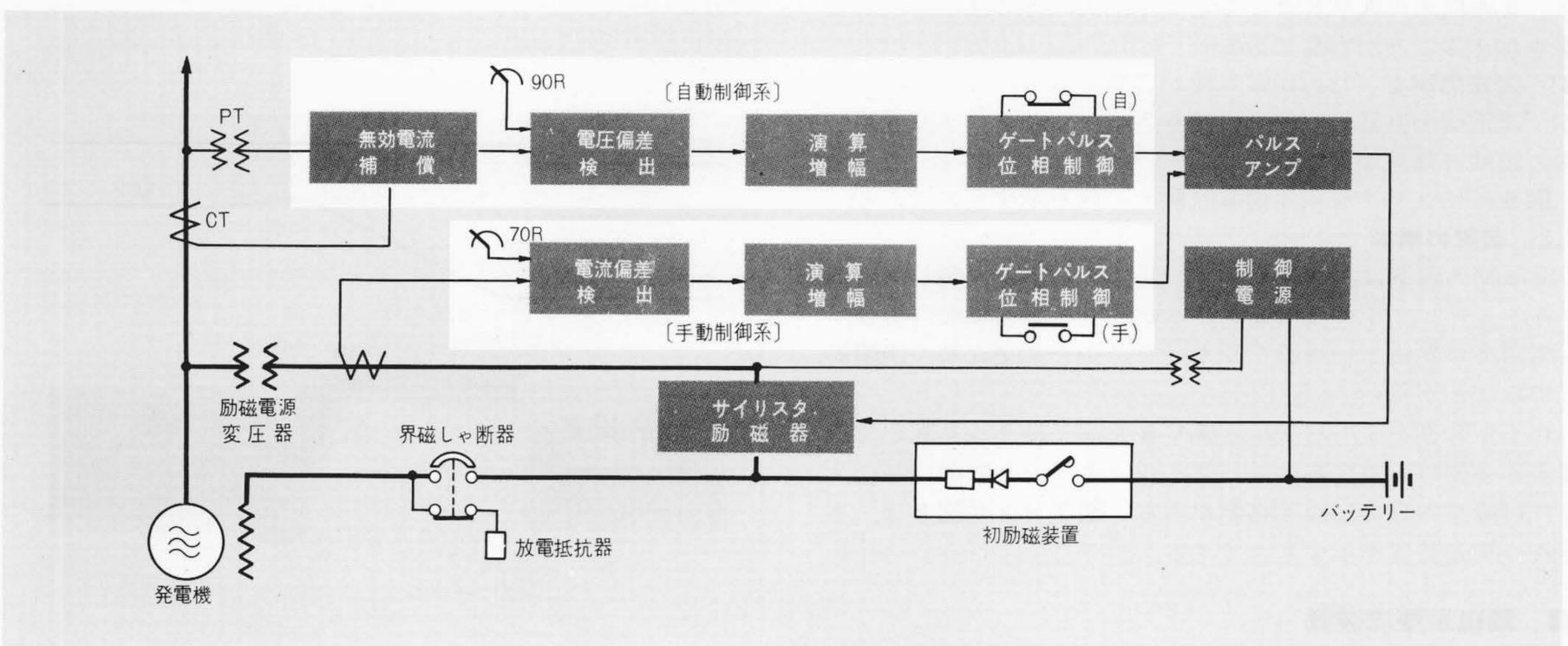


図4 サイリスタ分巻自励方式の制御回路図 大容量発電機への適用例を示す。

Fig. 4 Schematic Diagram of Thyristor Excitation System

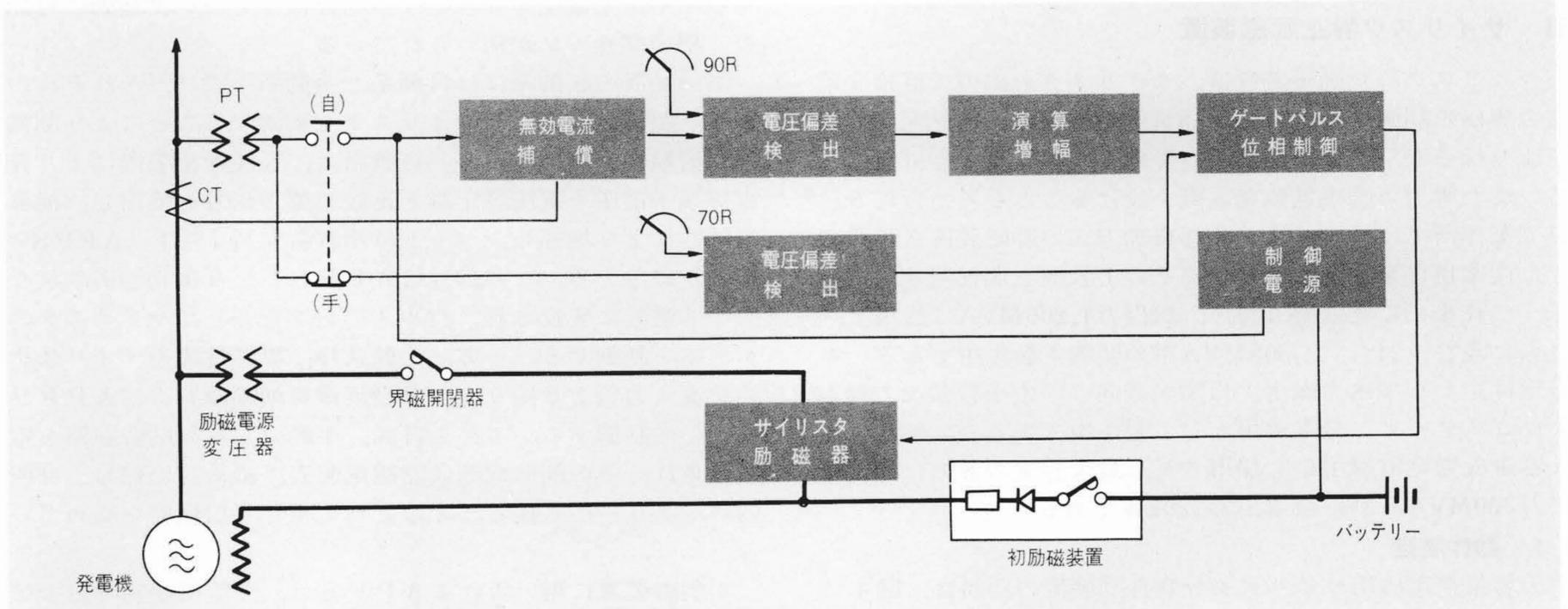


図5 サイリスタ分巻自励方式の制御回路図 中・小容量機への適用例を示す。

Fig. 5 Schematic Diagram of Thyristor Excitation System

とし、いかなる場合でもすみやかに電圧を確立できるようにしている。

なお自家発電向けなどの励磁容量の比較的小さい発電機用には、手動系を発電機端子電圧制御とし制御装置全体をコンパクトにまとめた方式を用いている。図5はその制御回路を示すものである。

### 3.2 特長

- サイリスタ励磁装置の特長としては次のものがあげられる。
- (1) 速応励磁を要求される場合には、発電機電圧変動に対しAVRを介して界磁電圧を50ms以内に応答させることもできる。
  - (2) 界磁頂上電圧は必要に応じて発電機界磁巻線が許容する範囲で使用上必要とする任意の値を実現することができる。しかし、特に指定のない場合には公称スリップリング電圧の1.5倍を標準としている。
  - (3) 制御装置の電子回路化、高性能化により装置が小形化され、また従来のAVRによる定電圧制御以外の種々の制御要素を加えることが容易である。
  - (4) 回転部がないため保守点検が容易である。
  - (5) 発電機軸直結の回転励磁機を省略することにより建屋寸法の縮減の効果が大きい。

図6はインデシヤル応答試験の一例を示すものである。

### 3.3 装置の構成

励磁制御装置は、AVR、サイリスタおよび界磁しゃ断器の各キュービクルより構成されるが、中・小容量機の場合、直流回路の界磁しゃ断器をやめ、サイリスタ交流側の開閉器とすることが多い。

サイリスタキュービクルとAVRキュービクルを離して設置する必要がある場合には、サイリスタゲート制御回路のノイズ対策を十分に行なう必要がある。図7および図8は、本方式の制御装置を示すものである。

## 4 励磁用整流装置

以上述べてきた交流励磁機とサイリスタ励磁装置において、発電機界磁回路に設置される整流器としては前者はシリコン整流器が、後者はサイリスタが用いられる。

### 4.1 整流装置の定格

励磁用整流装置の定格は、発電機定格運転時の所要励磁容量に対して電圧、電流とも適当な余裕をとったものとしており整流素子の並列枚数決定に際してはさらに総合的に考えて余裕を設けている。また整流装置の逆耐電圧は、通常界磁回路定格電圧の数倍とし、サイリスタ励磁装置においては、励磁頂上電圧によって決まる励磁電源変圧器の二次電圧との関係からサイリスタの直列枚数を決定している。

### 4.2 整流装置の構造

整流装置の構造として整流素子を組み込んだ冷却フィンで絶縁板などに固定するスタック式と引出し構造のわくに組み込むトレイ式がある。このトレイ式は、主機運転中に整流素子の交換が可能であり、系統運用に重要な発電所に適しているが、近年、電力用サイリスタおよびシリコン整流器の信頼性が向上するとともに構造の簡単なスタック式に移行していく傾向にある。

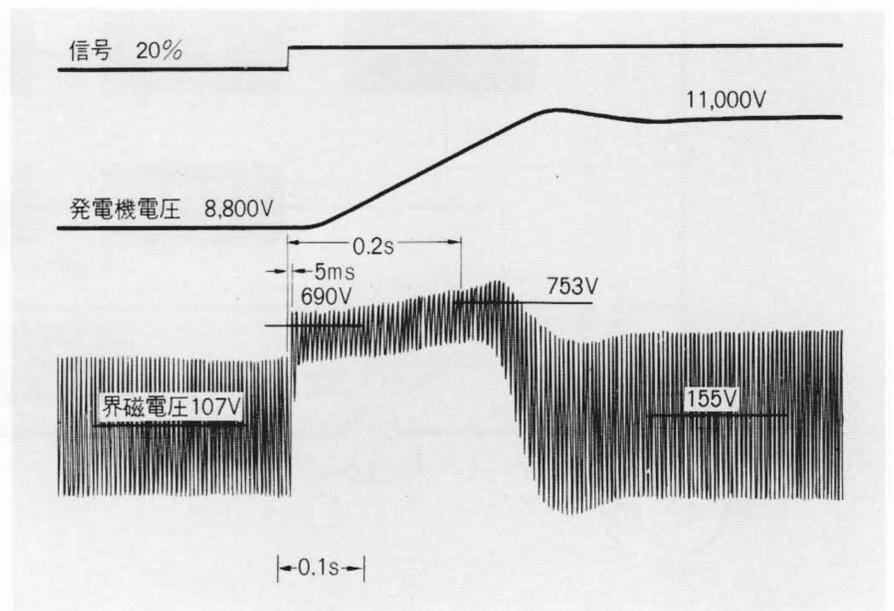


図6 インデシヤル応答試験 66MVA水車発電機用サイリスタ分巻自励装置の特性を示す。

Fig. 6 Indicial Response Test Result of Thyristor Excitation System

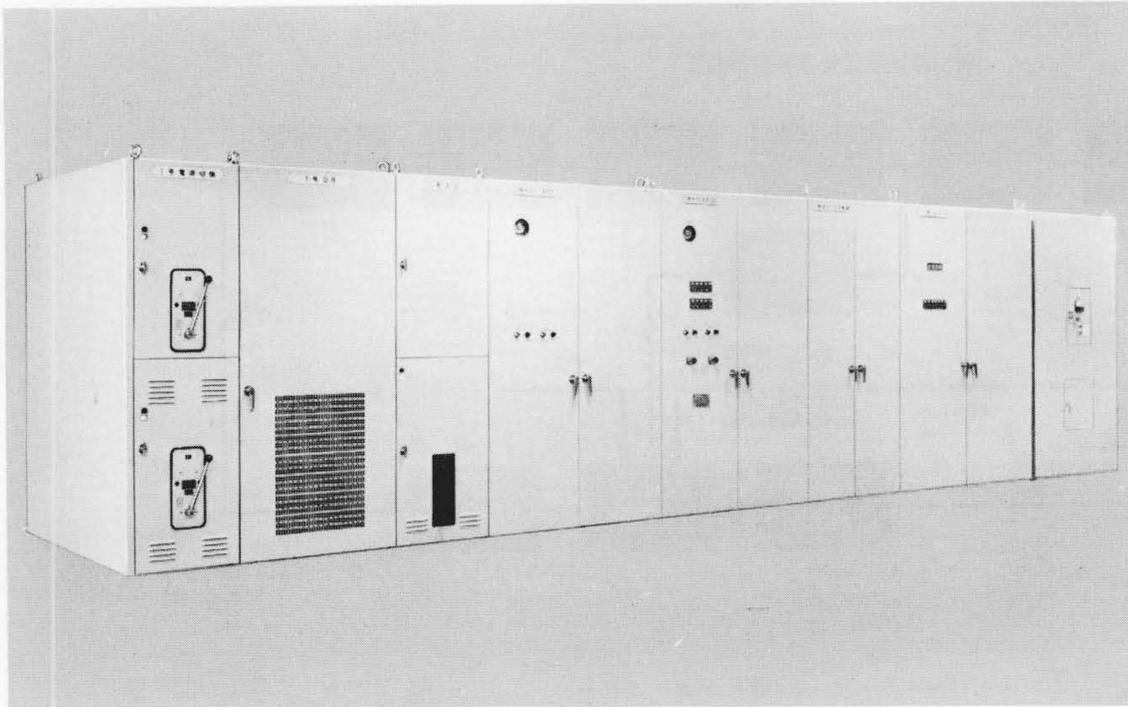


図7 サイリスタ分巻自動装置 界磁しゃ断器キュービクル、サイリスタキュービクルおよびAVRキュービクルが隣接されている。

Fig. 7 Control Cubicles of Thyristor Excitation System

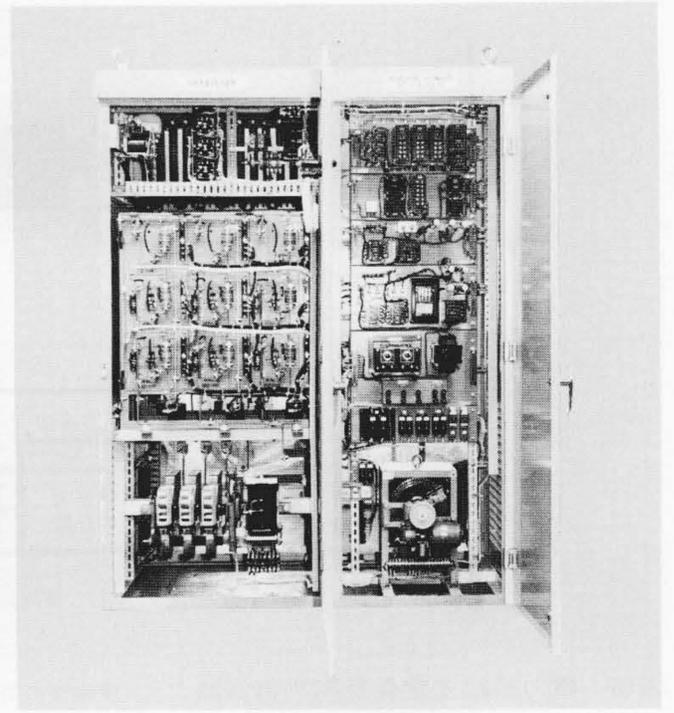


図8 サイリスタ分巻自動装置 27,687kVAガスタービン発電機用屋内形励磁制御キュービクルを示す。

Fig. 8 Control Cubicle of Thyristor Excitation System

### 4.3 冷却方式

整流装置の冷却方式としては自然冷却式、強制風冷式があるが交流励磁機およびサイリスタ励磁装置用としては強制風冷式とすることにより装置の小形化を図っている。自然冷却方式は特に要求される場合、および単独運転その他過酷な運転をする発電機などに用いられている。

強制風冷方式においては、大容量発電機用は通常冷却ファンを常用機と予備機の二組とし、常用ファン故障時にはただちに予備ファンが自動起動し、発電機は出力を変えることなく、運転を継続できるようにしてある。なお冷却ファンの電源は、発電機ユニット用および所内共通回路などの2系統から採ることが望ましい。このほか強制風冷の特例として、水車発電機風胴内の風を使って整流器の冷却を行なう方式についても実績を有している。

### 4.4 保護方式

サイリスタおよびシリコン整流器素子は、一般に過電圧、過電流耐量が小さいため保護回路により素子の破壊を防止する必要がある。

#### 4.4.1 過電圧保護

励磁用整流装置に侵入するサージ電圧は、発電機固定子から移行してくるサージのほか、サイリスタ励磁装置の場合には励磁電源変圧器からの移行サージがある。また発電機を異位相あるいは異電圧で投入した場合および非同期運転時に発電機の電機子反作用により界磁回路に過渡的に交流電流が誘起し、界磁電流がある時点で負の値をとり（すなわち、逆方向に流れようとして）整流素子によりブロックされ、素子の端子間に高い逆電圧の発生することがある。

同期投入時の界磁過電圧発生は300 MVA級の計算例では発電機よりみた主回路側の外部インピーダンスが0.2 pu程度あれば相差角単独のずれの場合は20度程度まで、電圧単独の相違の場合には発電機電圧が系統電圧より13%程度低い状態までは許容できると報せられている<sup>(3)</sup>。

これら過電圧に対しては整流器直流側および交流側に図9に示すC-Rサージアブソーバとセレンアレスタを設けることにより保護されている。なおサイリスタ励磁装置の場合、励

磁電源変圧器の高・低巻線間に設ける混触防止板を接地し、高・低圧の混触による危険を防止するとともに変圧器高圧側からの移行サージを低減している。

#### 4.4.2 過電流保護

整流装置に流れる過渡時の過電流としては整流回路の1枝が短絡し、交流励磁機あるいは励磁電源変圧器がその枝を介して短絡する場合のほか、主発電機が三相短絡を生じ、その誘導で界磁巻線に大きな電流が流れる場合などがある。このうち整流回路の1枚短絡に対してはハイラップヒューズによって事故素子のみを高速しゃ断し、警報するものとし、発電機三相短絡時の界磁誘起電流に対しては、整流装置に過電流耐量の大きな素子を選定して事故電流に耐えるものとしている。このほか冷却装置故障などによって素子が許容電流以上になり、接合部温度が上昇した場合には温度継電器によって検出し、発電機の運転を停止することにより素子の破壊を防止している。

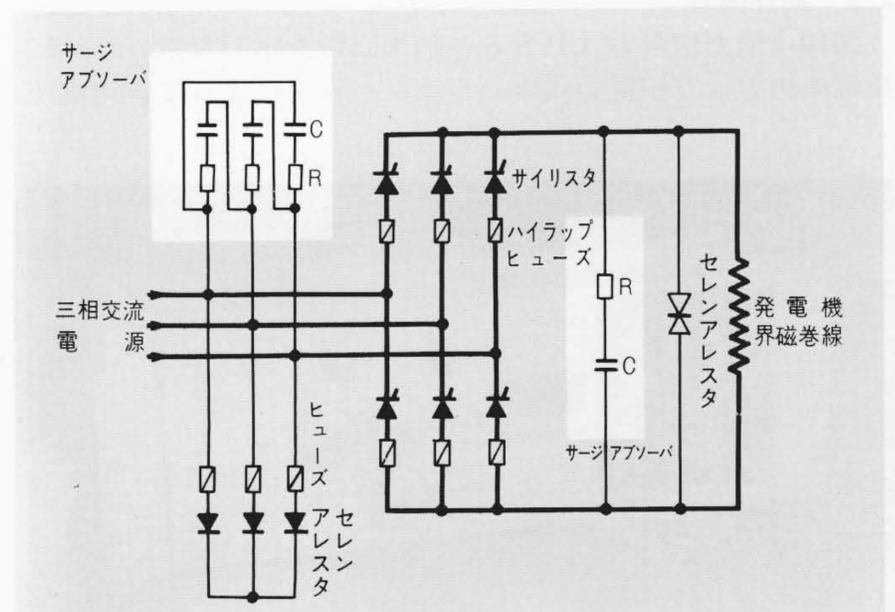


図9 整流器用保護装置 整流装置の入力、出力にC-Rサージアブソーバおよびセレンアレスタを設け、外来サージを防止している。

Fig. 9 Surge Absorber and Selenium Arrester for the Rectifier Exciter

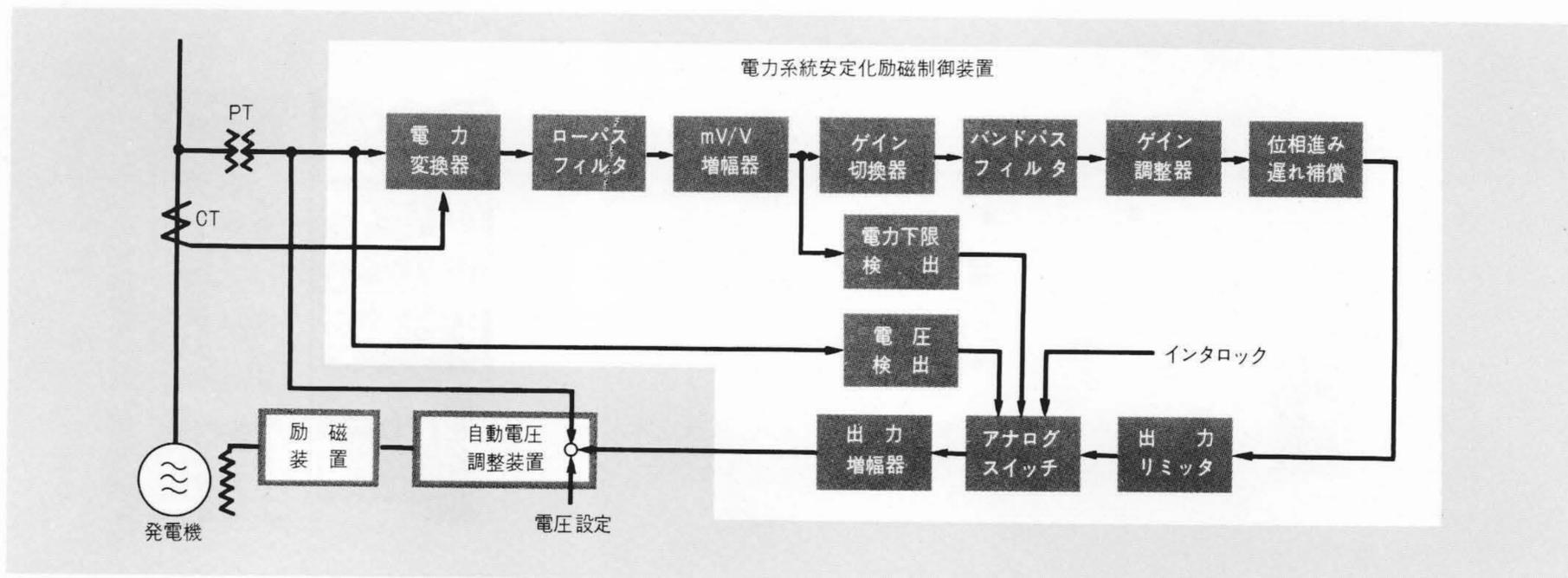


図10 電力系統安定化励磁制御回路 発電機の電気出力の変化を検出して、励磁装置へ安定化信号を与える。

Fig. 10 Schematic Diagram of Power System Stabilizer

### 5 電力系統安定化励磁制御装置

電力系統の安定度に及ぼす励磁制御の効果については以前からその速応性のみが注目されてきたきらいがあった。しかしここ数年来のデジタルコンピュータによる詳細な解析によって次の点が明らかにされてきた。

- (1) 速応性能が高く、頂上電圧の高い励磁系は、系統故障によって生ずる同期機の加速を抑制する効果がある。
- (2) 一方、相差角動揺の制動に関しては、高速励磁系は必ずしも有効ではなく、系統条件によっては高ゲインの定電圧制御は制動力を減ずることがある。

したがって動態安定度の改善はもちろんのこと、過渡安定度についても電力動揺第二波以降の相差角動揺の減衰を考えた場合は、励磁系の速応性能のみでは安定度改善の目的には十分とはいえない。そして最近の研究成果は、発電機の軸速度、周波数、電力などの信号を位相補償回路を介して励磁制御系に加えることが電力系統の制動力を改善するのに非常に有効であることを理論的ならびに実験的に証明している。日立製作所では安定化装置(以下、PSSと略す)の開発にあたり、各式方を解折検討し、発電機電力信号方式を採用することにした。

#### 5.1 動作原理

図10は電力信号方式PSSの制御回路を示したものである。発電機出力は三相電力式ホールコンバータによって直流電圧

に変換されバンドパスフィルタによってその動揺成分のみが取り出され、定常値や出力調整などのゆっくりした変動成分は除去される。フィルタ出力は増幅器によって必要なシステムゲインが与えられ、さらに位相進み遅れ回路によって適当な位相補償が行なわれ、出力リミッタ、出力増幅器を介してAVRに制御信号として与えられる。以上述べたように、PSSはAVRの設定値を変化する信号を与えるので、装置故障の検出回路が設けられ、さらに発電機の過電圧、低電圧、電力下限検出などの保護回路が設けられている。図11はPSSのパッケージユニットを示すものである。

#### 5.2 特長

発電機電力信号方式によるPSSの特長は次のとおりである。

- (1) サイリスタ励磁装置などの高速励磁系に適応する場合、電力信号の場合は位相遅れ回路となり、発電機軸速度や周波数信号方式による位相進み回路に比べノイズの影響を受けにくい。
- (2) 発電機軸速度や周波数信号は、その微小な変化を検出する必要があるのに対し、電力信号方式は電力変換器で容易に直流電圧に変換し、検出回路を単純化することができる。

### 6 結 言

最近の大容量同期発電機用励磁装置として、交流励磁機およびサイリスタ静止励磁装置について紹介した。これら電子制御化された励磁制御装置は、運転保守の容易さに加え、速応性能において理想的な状態に近づきつつあり、電力系統の安定運転の目的から、多様化された励磁制御の要求にも応じられるようになってきている。PSSは同期機の制動力を増加する機能を持つ新しい励磁制御装置であって速応励磁性能とあいまって電力系統の安定運転に果たす励磁制御の役割は一段と強化されたといえる。このような制御機能の高度化の傾向は今後もさらに拡大されていくことが予想される。

#### 参考文献

- (1) F. P. Demello, C. Concordia : IEEE PAS-88 No. 4 p.316~329(1969)
- (2) 高橋ほか：昭和45年電学会東京支部 No. 254
- (3) 庄山ほか：日立評論「タービン発電機の励磁方式」51, 1092 (昭和44-12)

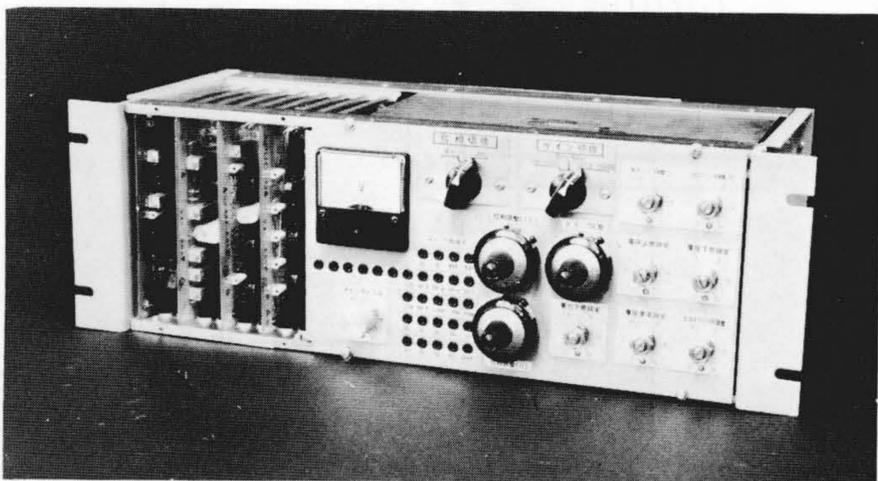


図11 電力系統安定化励磁制御装置ユニット 信号演算装置の収納を示す。

Fig. 11 Control Unit of Power System Stabilizer