

最近の同期機用励磁調整装置

The Modern Excitation Control Equipments for Synchronous Machines

廣 吉 秀 高* 前 沢 嗣 伸*
Hidetaka Hiroyoshi Tsugunobu Maezawa

内 容 梗 概

最近の大容量発電機はあらゆる面で経済的設計が行なわれており、その安定運転のためにはすぐれた特性の励磁調整装置が不可欠のものとなってきた。

これに応じて励磁調整装置は精度、速応性、安定度、信頼性において最近飛躍的な進歩をとげている。本文はこれらの仕様を満足する日立 HTD 形および磁気増幅器形の両自動電圧調整装置、複巻自動式励磁装置ならびにこれらと組み合わせ使用される付属装置、応用制御装置についてのべている。

1. 緒 言

年々増大する電力需要に応じて建設、拡充の一途をたどっている発電、送配電設備運営の安定性と経済性を大きく向上させるものとして、高性能の発電機用自動電圧調整装置が不可欠のものとなってきている。

すなわち広範な電力網において、大電力を長距離送電線により送電する場合の過渡安定度の向上、都会地におけるケーブル系統増大にともなう軽負荷低励磁運転時の動態安定度の増大、超高压無負荷送電線の充電容量を拡大させるための負励磁電圧安定度の確保など、自動電圧調整装置の性能によって大きく左右されることが明らかとなってきている。

一方最近の発電機は経済性の面から小形化が推進され、運転上の余裕も少ないものとなってきているが、これに対し発電機用励磁調整装置は著しい発達をとげてすぐれた特性を発揮しうようになり、主機の安定運転確保に大きく寄与している。

以下最近の同期機用励磁調整装置について、動作原理、方式、装置、特性などをのべる。

2. 最近の日立同期機用励磁調整装置

日立製作所においては、古くから同期機用自動励磁調整装置として、振動形や抵抗器形の自動電圧調整器を数多く生産し、主機とともに満足すべき運転実績をおさめてきている。しかし電力需要の増大、系統の拡大にともないすぐれた定電圧保持能力と高い速応性が求められるにおよび、これに好適な励磁調整装置として増幅発電機 HTD を主体とする連続制御方式の自動電圧調整装置を開発し、1953 年以来数多くの同期機用として使用している。

一方静止形磁気増幅器の性能の向上、大容量化が急速に進み、HTD に代わって磁気増幅器が主電力増幅部を受け持ち、大容量機にまで磁気増幅器形電圧調整装置が適用できるようになってきている。これらの装置はいずれも直流または交流の励磁機を介して主機の励磁制御を行なう点では従来の方式と同様である。

これに対し、ゲルマニウム、シリコンなどの大容量半導体整流器が実用化し、全静止形の励磁機なし自動式励磁装置が開発されてきた。とくに発電機出力電流を界磁に正帰還した複巻式自動装置は高い励磁系速応度、主機寸法の低減、経済性、全静止、無消耗などにおいてすぐれた性能を示している。

増幅器形自動電圧調整装置、複巻自動式のいずれにおいても励磁調整装置として、次の仕様をすべて満足させることを設計、製作の基本としている。

(1) 精 度

* 日立製作所国分工場

増幅度を十分高くとり、不動部を最少にして制御誤差を標準 $\pm 1\%$ (要すれば $\pm 0.5\%$) 以内とする。

(2) 速 応 性

調整装置のみでなく励磁機器をも含めての励磁系電圧速応度を高くする。

(3) ド リ フ ト

使用条件によるドリフトは制御誤差以内とする。

(4) 安 定 性

調整系の構成は主機および電力系統の変動の影響を最も少ないものとし、系統短絡などの異常時に最大能力を発揮できるものとする。

(5) 運 転 不 断 の 確 保

装置不具合時など励磁を急変させることなく、安全に手動調整に切り換えて主機運転継続可能とする。

(6) 信 頼 性

装置、要素には十分な裕度をもたせ堅ろうな構造として悪条件での連続運転を可能とする。

(7) 付 属 装 置

並列、低励磁運転などのための付属装置を完備し、組合せ使用を容易とする。

(8) 調 整

装置は工場試験後アナログ計算機により解析し、最適調整値を定め、現地試運転を完全かつ容易とする。

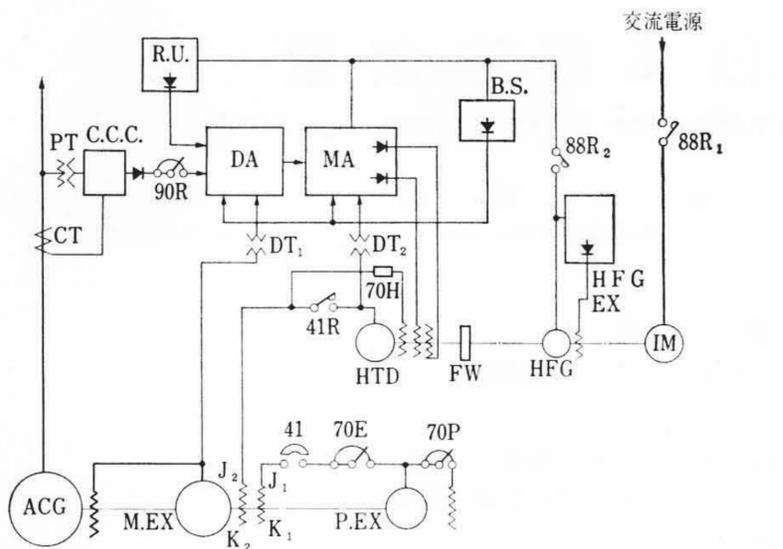
上記を満足する日立励磁調整装置について、以下に具体的な説明を加える。

3. HTD 形自動電圧調整装置

3.1 動 作 原 理

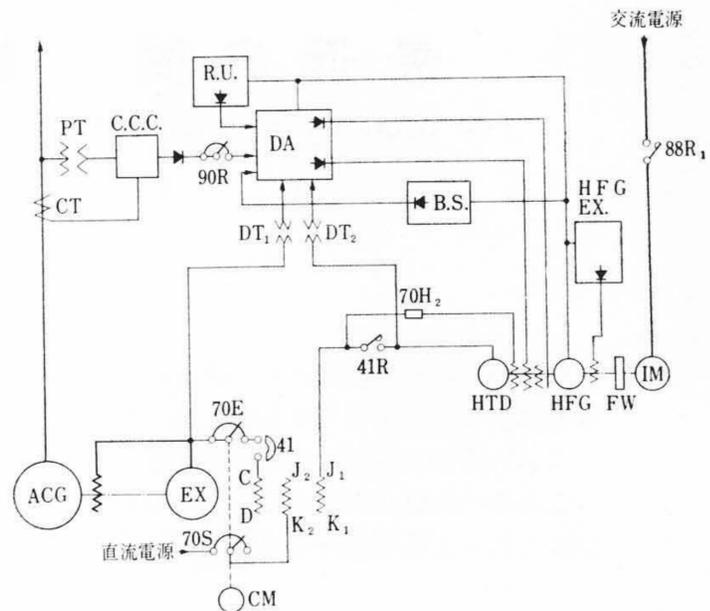
HTD 形自動電圧調整装置は、増幅発電機 HTD (Hitachi Tuning Dynamo) のすぐれた電力増幅特性を利用した連続制御方式の装置である。第 1 図はその単線接続図である。同期機の端子電圧は検出回路で基準電圧と比較され整定値からの偏差が検出される。検出された偏差は 2 段の磁気増幅器と HTD により増幅され、主励磁機界磁に正または負の制御励磁を与え、主励磁機出力電圧を調整することによって、同期機端子電圧を整定値に制御する。この閉回路制御系の増幅率は十分高く選ばれていて、発電機の電圧制御誤差は標準として $\pm 1\%$ 以下、(要すれば $\pm 0.5\%$ 以下) に十分おさめられている。

主励磁機の界磁巻線 $J_1 K_1$ には、通常、副励磁機からの励磁が与えられ、かつ、界磁調整抵抗器 70E によって安定で精密な手動調整が行なえるようになってきている。自動電圧調整装置を使用する場合にも副励磁機からの励磁は、主励磁機の基本励磁として与えられており、これに加えて同期機の電圧偏差に速応した正または負の制御励磁



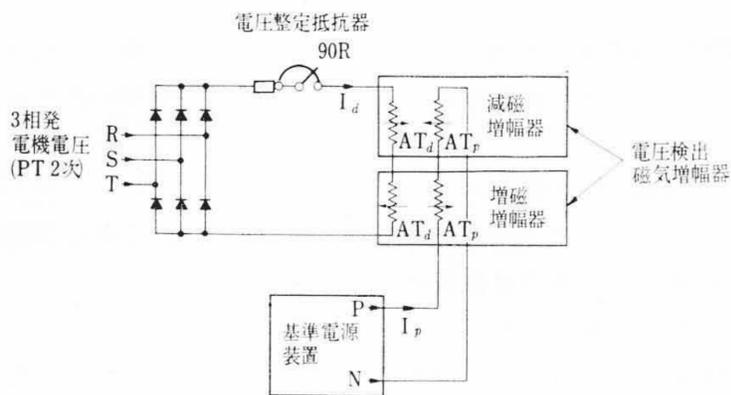
- ACG: 同期発電機
- M.EX: 主励磁機
- P.EX: 副励磁機
- 41: 界磁開閉器
- 70E: 主励磁機界磁調整抵抗器
- 70P: 副励磁機界磁調整抵抗器
- HTD: HTD形増幅発電機
- FW: フライホイール
- HFG: 高周波発電機
- IM: 誘導電動機
- PT: 計器用変圧器
- CT: 計器用変流器
- C.C.C.: 横流補償装置
- 90R: 電圧整定抵抗器
- R.U.: 基準電源装置
- DA: 初段磁気増幅器
- MA: 中間磁気増幅器
- B.S.: バイアス電源
- HFG.EX: 高周波発電機用励磁装置
- DT₁, DT₂: 乱調防止用ダンピングトランス

第1図 HTD形自動電圧調整装置接続図（副励磁機付）



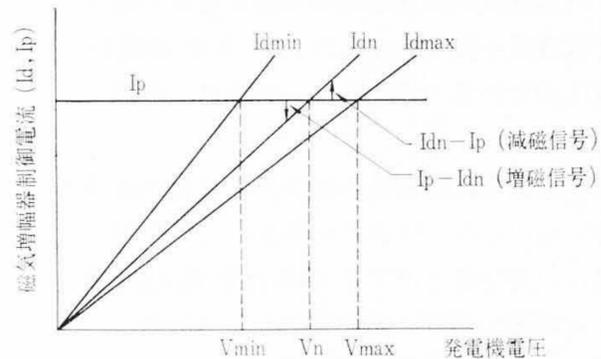
- ACG: 同期発電機
- EX: 励磁機
- 41: 界磁開閉器
- 70E: 界磁調整抵抗器
- 70S: 安定界磁調整抵抗器
- HTD₁, HTD₂: HTD形増幅発電機
- FW: フライホイール
- HFG: 高周波発電機
- IM: 誘導電動機
- CM: 操作電動機
- PT: 計器用変圧器
- CT: 計器用変流器
- C.C.C.: 横流補償装置
- 90R: 電圧整定抵抗器
- R.U.: 基準電源装置
- D.A.: 磁気増幅器
- B.S.: バイアス電源
- HFG.EX: 高周波発電機用励磁装置
- DT₁, DT₂: 乱調防止用ダンピングトランス

第2図 HTD形自動電圧調整装置接続図（副励磁機なし）



- I_d: 検出コイル制御電流
- I_p: 基準コイル制御電流
- AT_d: 検出コイル制御アンペアターン
- AT_p: 基準コイル制御アンペアターン

第3図 電圧偏差検出装置接続図



第4図 電圧偏差検出装置特性

を、HTDから主励磁機界磁巻線J₂K₂に与えられることになる。

HTD形自動電圧調整装置はまた、副励磁機を持たない分巻励磁機にも適用できる。第2図はその一例を単線接続図で示したものである。自動電圧調整装置の部分は第1図と変わらない。このような分巻励磁機の手動電圧調整は分巻界磁CDの回路の界磁調整抵抗器70Eによって行なわれる。特に低い電圧では安定界磁巻線J₂K₂を直流別電源から励磁し、励磁機定格電圧の十分低い範囲まで安定な電圧制御が行なわれるようにしてある。安定界磁の調整抵抗器70Sは70Eと機械的に連動されており、安定界磁巻線の電流が必要にして最少な値となるようにしてある。

自動電圧調整を行なう場合には、副励磁機付の場合と同様に、分巻界磁の基本励磁に加えて、第2図のようにHTDからの正負の調整励磁を励磁機界磁J₁K₁に与えて同期機端子電圧を制御する。また他の方法としてHTDを分巻界磁に直列に接続して、調整励磁を与える方式も行なわれている。

3.2 電圧偏差検出装置

本電圧調整装置は電力用として好適な、三相平均値電圧応動方式である。第3図に示すように、同期機端子電圧は三相全波整流され、電圧整定抵抗器90Rを介して、プッシュプル接続された初段磁気増幅器DAL, DARの制御巻線に直流制御電流I_dとして与えられる。一方、別の制御巻線には基準電源装置からの一定電流I_pが与えられており、この基準電流I_pに対する検出電流I_dの偏差として電圧偏

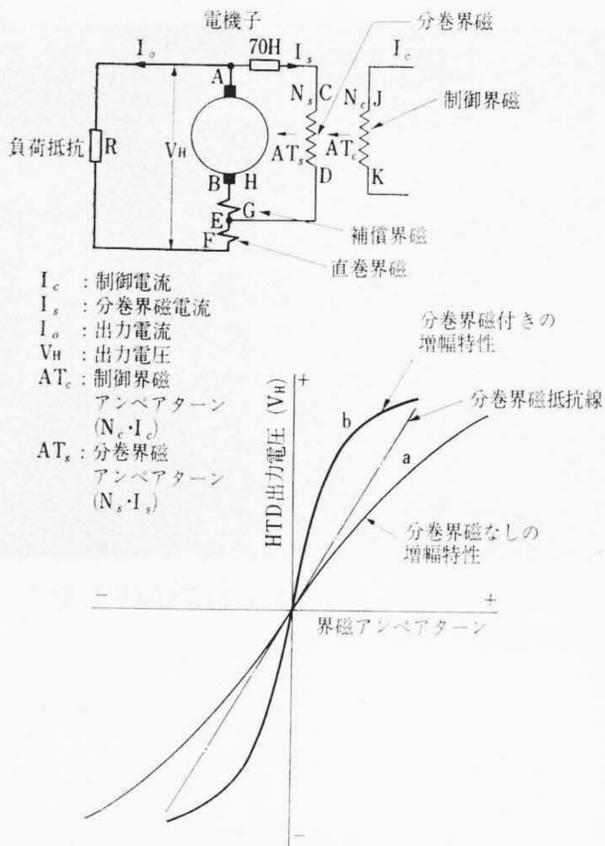
差が検出される。第4図に検出回路の特性を示す。I_dとI_pとの交点は整定電圧であり、I_dの傾斜は電圧整定抵抗器90Rの加減によって変えられ、発電機電圧を定格電圧の+10%から-20%の間任意に整定できる。

3.3 増幅器

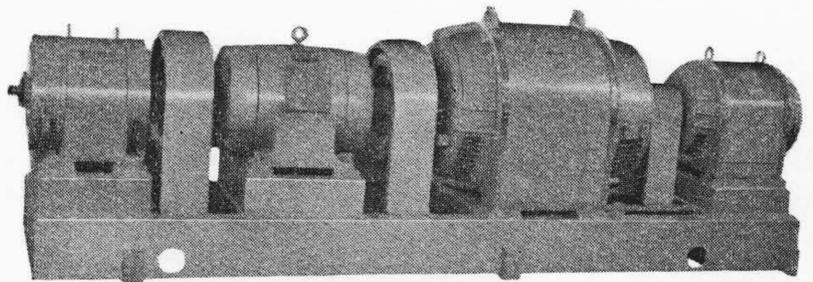
本装置の前段増幅器として使用される磁気増幅器は最近のものでは400 c/sまたは420 c/sの電源を使用した高周波磁気増幅器が使用され、増幅器の応答速度を早めるとともに、電源をHTDセットに直結した高周波発電機から供給することによって制御電源を安定確実なものとしている。磁気増幅器はプッシュプル接続で、正負の出力が得られ、かつ、電圧、周波数、温度などによる増幅器出力のドリフトを少なくしている。

主増幅器として使用されるHTD形増幅発電機は第5図に示すように分巻界磁巻線CD、および制御用他励界磁巻線JKを持つ直流発電機である。継鉄、各磁極、電機子にはケイ素鋼板を使用して、特別の熱処理をほどこしてあり、かつ、主極を分割極構造として速応性を高めている。さらに、分巻界磁巻線CDに電機子端子から同調率調整抵抗器70Hを介して正帰還を与えることによって、分巻界磁がない場合の第5図の曲線aが曲線bによって示されるような高い増幅率を持つようになる。

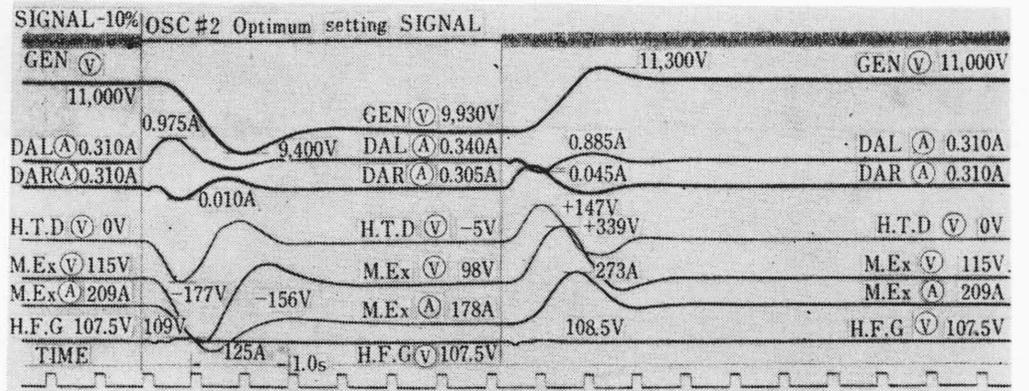
HTD形増幅発電機は高周波発電機とともにかご形誘導電動機によって駆動され、その電源は所内電源から供給される。駆動電動機として分巻直流電動機を使用することもできるが、その場合、電源



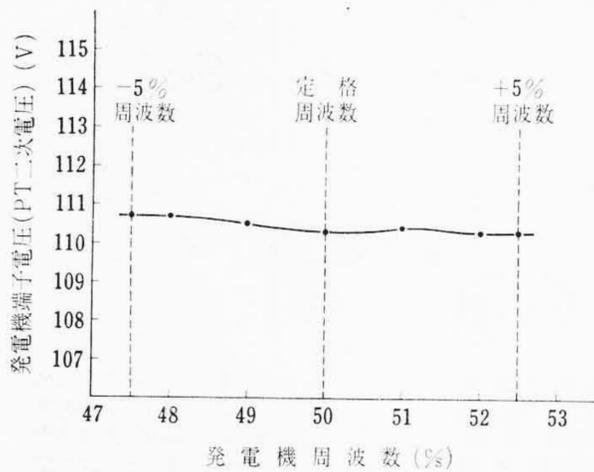
第5図 HTD形増幅発電機接続図および制御特性



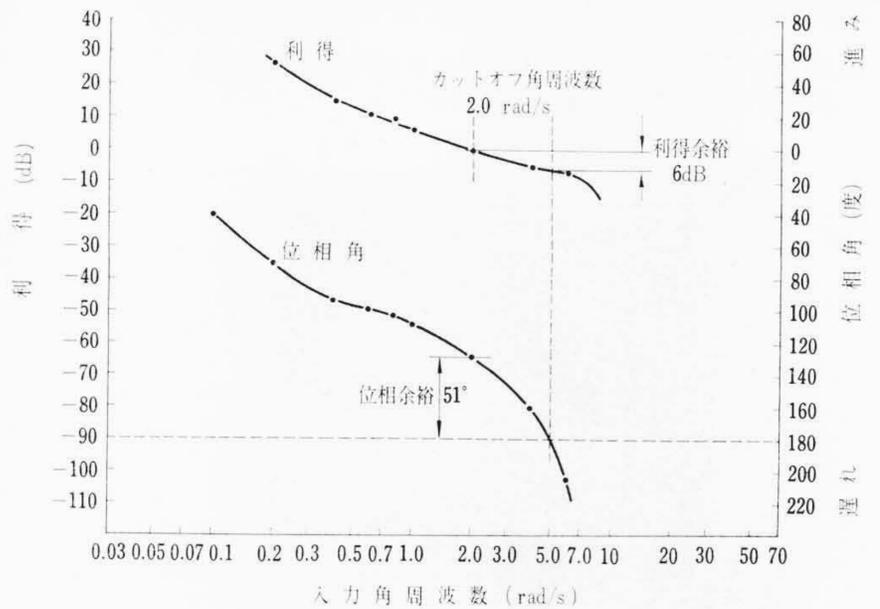
左から 1kVA 高周波発電機, 15HP 誘導電動機, 5kW HTD, 0.5kW HTD
第6図 HTD形増幅発電機機セット



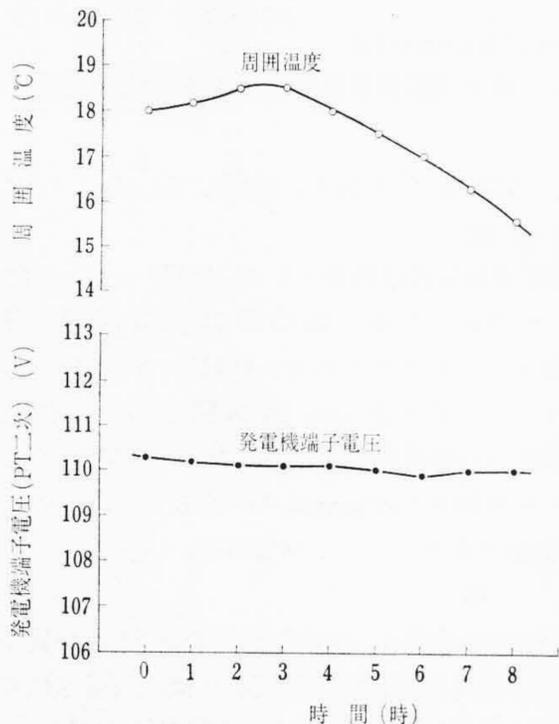
第9図 HTD形自動電圧調整装置インディシャル応答特性オシログラム



第7図 HTD形自動電圧調整装置の周波数特性



第10図 HTD形自動電圧調整装置周波数応答特性



第8図 HTD形自動電圧調整装置温度ドリフト特性

は発電機に直結された副励磁機から与えられる。

第6図は 128 MVA 発電機用自動電圧調整器に使用された HTD セットであり、左から 1kVA 高周波発電機, 15 HP 誘導電動機, 5 kW HTD, および 0.5 kW HTD である。電動機の両側にはカップリ

ングを利用したフライホイールが設けられており、電源の短時間の喪失に際しても、励磁機の頂上電圧を発生させるのに十分な出力を保持できるようにしてある。

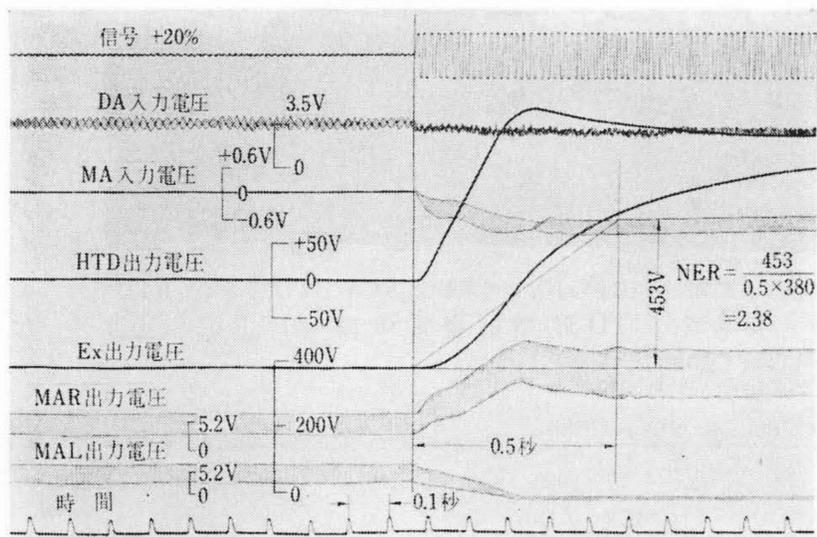
3.4 特 性

HTD 形自動電圧調整装置は発電機および制御電源の、電圧、周波数、周囲温度の変動によって誤差を生じないように、基準電源装置をはじめとする制御回路の特性に十分な考慮が払われている。

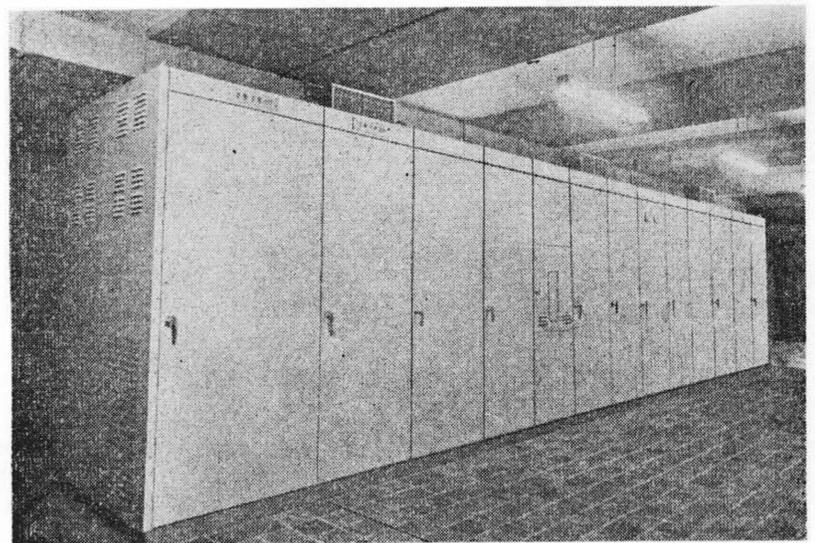
第7図は発電機周波数変動に対する制御特性の実測値である。50 c/s $\pm 5\%$ の周波数変動に対する電圧制御誤差は 0.4% 以下である。第8図は温度変化に対する電圧制御誤差を起動後 8 時間にわたって実測したものである。その間に周囲温度は 18.5°C から 15.6°C の間変化しているが、発電機電圧は、自身の内部温度変化の影響も含めて 0.4% 以下である。

自動制御系の動特性を表現する指標として、インディシャル応答特性と周波数応答特性が一般に用いられている。第9図は 75 MVA 発電機用自動電圧調整装置について実測したインディシャル応答特性である。 $\pm 10\%$ の整定電圧急変にตอบสนองして、発電機電圧は 0.5 秒で整定値に達し、1 回のオーバーシュートで安定に制御されている。

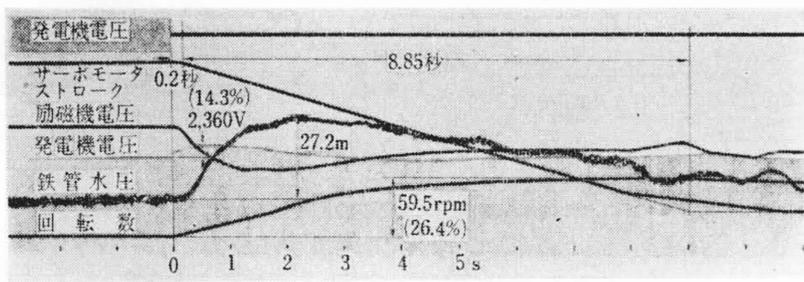
第10図は上記の自動電圧調整装置の周波数応答特性をボード線図として示したものである。カットオフ角周波数 2.0 rad/s に対し、



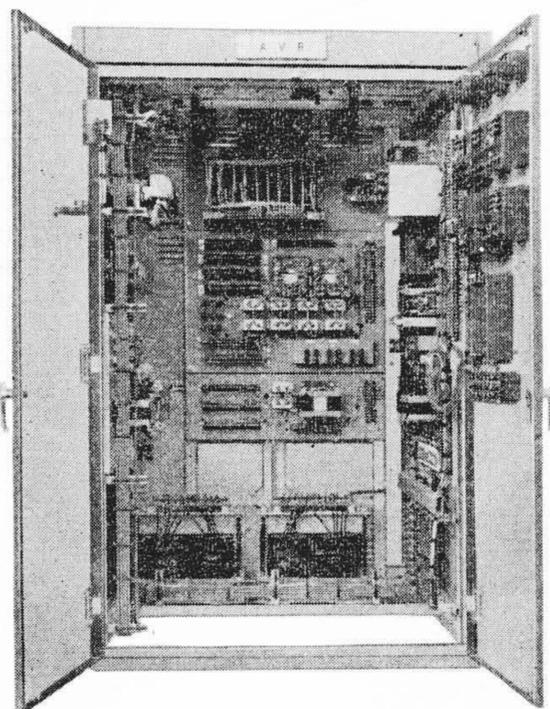
第11図 励磁系電圧速度試験オシログラム



第14図 電源開発株式会社池原発電所納 78 MVA 発電電動機用励磁機廻りキュービクル



第12図 電源開発株式会社御母衣発電所納 125 MVA 水車発電機負荷遮断試験オシログラム



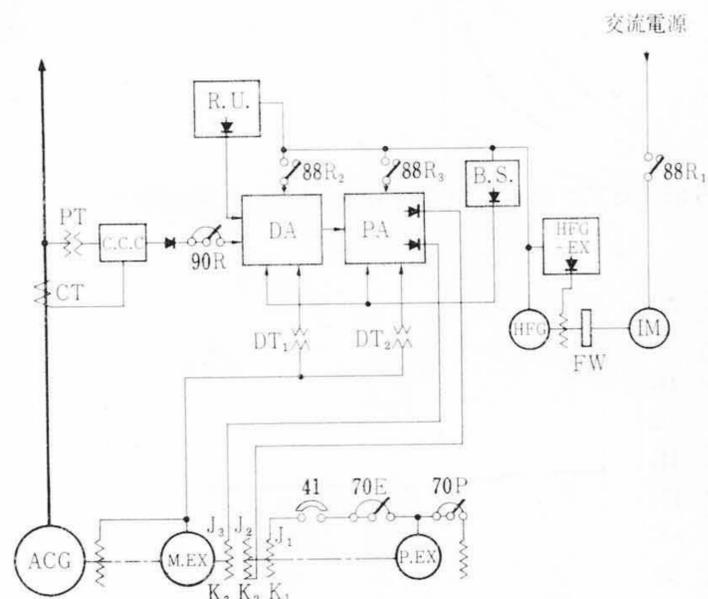
第13図 水車発電機用 HTD 形自動電圧調整装置キュービクル

利得余裕 6 dB, 位相余裕 51 度で, 十分なループゲインと安定度を持つ制御系であることが明らかである。

自動電圧調整装置を含む同期機の励磁系の速度度を表現するために, 励磁系電圧速度度が広く用いられている。励磁系電圧速度度は同期機の励磁系回路が使用状態に調整され, 励磁機が公称スリップリング電圧 (E_n) で無負荷で運転されているとき, 同期機の端子電圧が突然 20% 降下するのと等価な変動を自動電圧調整装置に与えた際, 変動を与えた瞬間から 0.5 秒間にえられる励磁機の等価電圧上昇の割合 (V/s) を E_n で割った値である。

第11図は, 78 MVA 水車発電機用自動電圧調整装置において実測した励磁系電圧速度試験のオシログラムである。得られた励磁系電圧速度度は 2.38 である。一般に励磁系電圧速度度の値は, 小容量機では 0.5 以上, 大容量機では 1.0 以上を標準としている。

第12図は 125 MVA 水車発電機の定格負荷遮断試験のオシログラムである。水車の回転数上昇 26.4% に対し, 発電機電圧上昇は最



- | | |
|---------------------|--|
| ACG: 同期発電機 | PT: 計器用変圧器 |
| M.EX: 主励磁機 | CT: 計器用交流器 |
| P.EX: 副励磁機 | C.C.C.: 横流補償装置 |
| 41: 界磁開閉器 | 90R: 電圧安定抵抗器 |
| 70E: 主励磁機界磁調整抵抗器 | R.U.: 基準電源装置 |
| 70P: 副励磁機界磁調整抵抗器 | DA: 初段磁気増幅器 |
| HFG: 高周波発電機 | PA: 主磁気増幅器 |
| IM: 誘導電動機 | B.S.: バイアス電源 |
| FW: フライホイール | DT ₁ , DT ₂ : 乱調防止用ダンピングトランス |
| HFG-EX: 高周波発電機用励磁装置 | |

第15図 磁気増幅器形自動電圧調整装置接続図

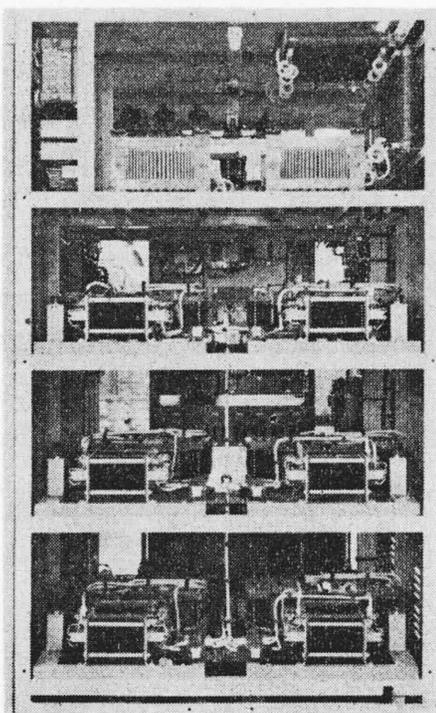
大 14.3% であり, 3 秒後に定格電圧に復帰している。

3.5 装置の構成

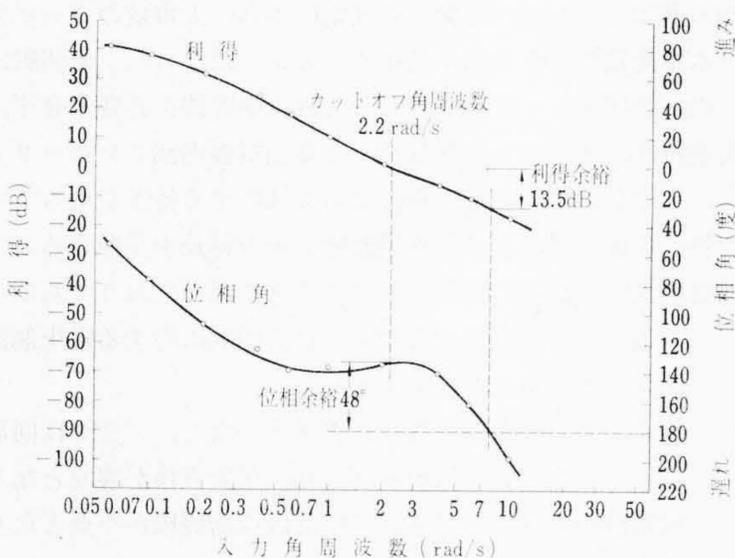
HTD 形自動電圧調整装置は標準として, HTD セットを除いて鋼板製キュービクルに収納される。第13図は標準の水車発電機用の自動電圧調整装置キュービクルを示す。HTD セットは, これをキュービクルに収納することもできるが, 第14図はその一例であり, 78 MVA 水車発電機用の自動電圧調整装置である。向かって右から 4 面が HTD セットを収納するキュービクルであり, 次の 3 面がその他の制御装置を収納するキュービクルである。

3.6 適用

HTD 形自動電圧調整装置は, 1953 年以来合計 82 台が製作されており, 主として大容量同期発電機, 同期調相機に適用されている。本装置が適用された発電機の総容量は 6,270 MVA に達し, 現在までに 19,374 MVA・年の運転実績を有している。最大容量のものは, 1960 年に製作された電源開発株式会社, 御母衣発電所納めの 125 MVA 水車発電機用と, 1965 年に製作された, パキスタン, マングラ発電所納の 125 MVA 水車発電機用の自動電圧調整装置であるが, これをさらに大容量機にまで拡張することは容易である。また, タービン発電機用のものとしては, 関西電力株式会社, 堺港火力発



第16図 三相六鉄心形磁気増幅器



第18図 磁気増幅器形自動電圧調整装置周波数応答特性

電所納の300 MVA 発電機用のものが1964年に製作されている。

4. 磁気増幅器形自動電圧調整装置

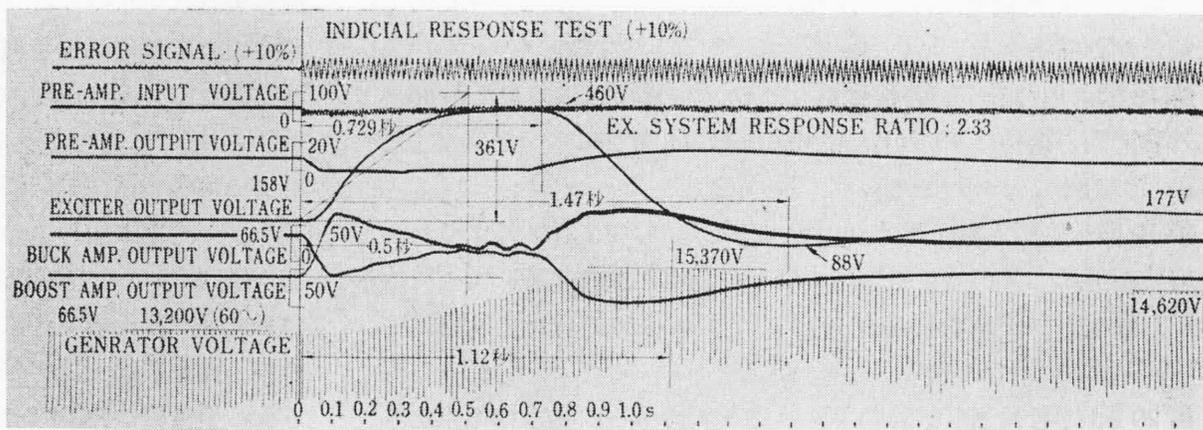
4.1 動作原理

磁気増幅器は、近年、半導体整流器や磁性材料の発達によって、高い性能係数をもつものが製作できるようになったので、静止、無消耗の利点によって、広く同期機の自動電圧調整装置に使用されている。磁気増幅器形自動電圧調整装置の励磁調整原理はHTD形と同一であり、その制御回路は第15図のとおりである。すなわち、HTDに代わるプッシュプル接続の磁気増幅器が主励磁機に正負の制御励磁を与えることによって、同期機の端子電圧を整定値に調整する。したがって、主励磁機は3個の独立した界磁巻線を持ち、 $J_1 K_1$ は副励磁機に接続されて基本励磁を負担し、他の2個の界磁巻線に自動電圧調整装置から、それぞれ $J_2 K_2$ 巻線には降圧方向、 $J_3 K_3$ 巻線には昇圧方向の制御励磁が与えられる。

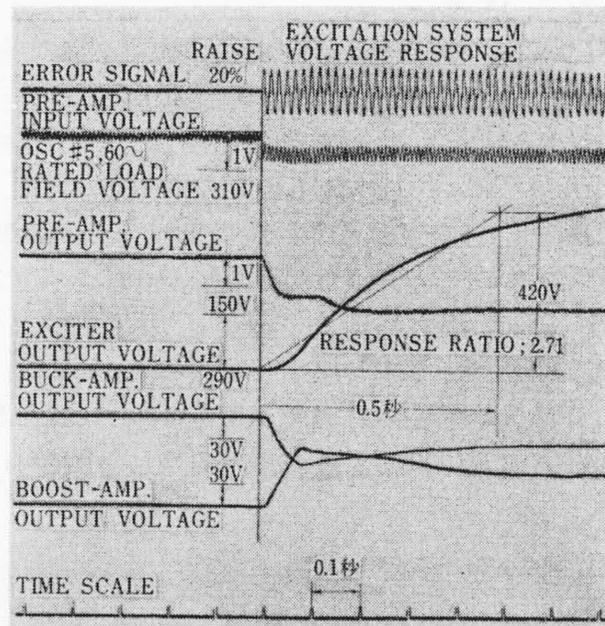
4.2 増幅器

本装置に使用されている磁気増幅器は初段増幅器としては単相の磁気増幅器が使用され、後段の電力増幅器には小容量のものは単相、大容量のものは三相六鉄心形が使用され、最大出力40 kWのものまで製作されている。第16図はキュービクルに収納された三相六鉄心形磁気増幅器を示したものである。4段のたなの下の3段には磁気増幅器が取り付けられ、最上段にはその出力調整抵抗が取り付けられている。

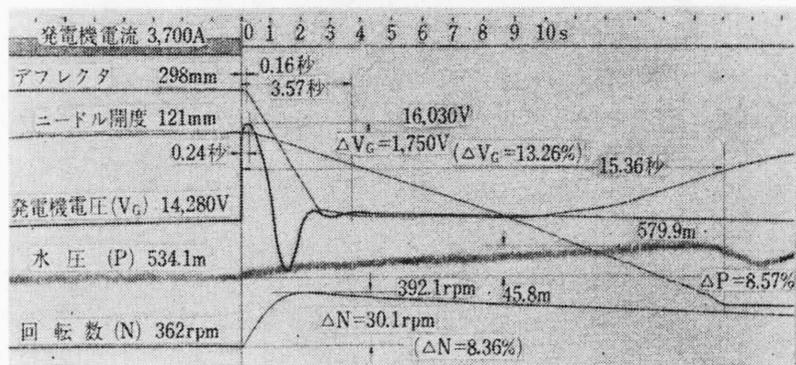
磁気増幅器に使用される鉄心にはすぐれた角形磁気特性を持つ



第17図 磁気増幅器形自動電圧調整装置インディシャル応答特性オシログラム



第19図 励磁系電圧速度度試験オシログラム



第20図 関西電力株式会社黒部川第四発電所納95 MVA 水車発電機負荷遮断試験オシログラム

ツェルパーマロイ、または方向性ケイ素鋼帯の環状鉄心が使用され、整流器には小容量のものにはセレン整流器、大容量のものにはシリコン整流器が使用されている。

磁気増幅器の交流電源としては、応答速度を早めるため、400 c/s または 420 c/s の高周波を使用し、専用の高周波発電機から供給されている。高周波発電機はかご形誘導電動機で駆動されるが、蓄勢輪を設けることによって、短時間の電源喪失時にも、十分な制御出力を出せるよう考慮されている。また、高周波発電機の励磁は励磁機無し自励方式として、磁気増幅器が用いられ、端子電圧は一定に保たれている。

4.3 特性

磁気増幅器形自動電圧調整装置の制御誤差や、電圧整定範囲などの特性はHTD形とまったく同一であり、周波数特性や温度特性においても、ほぼ同一のすぐれた制御特性を示している。

第17図から第20図までに、95 MVA 水車発電機用磁気増幅器形自動電圧調整装置において実測した、一連の過渡応答特性を示す。

第17図は+10%の整定電圧急変に対するインディシャル応答特

性である。発電機電圧は約0.7秒で整定値に達し、かつ、きわめて安定な制御経過を示している。

第18図は周波数応答特性であり、カットオフ角周波数2.2 rad/sに対し、利得余裕は13.5 dB、位相余裕は48度であり、十分安定な制御系であることがわかる。

第19図は励磁系電圧速度の実測値であり、2.7というすぐれた速度特性を示している。磁気増幅器形自動電圧調整装置によって得られた最大の励磁系電圧速度は4.67であるが、標準の速度は0.5から1.0としている。

第20図は、負荷遮断試験のオシログラムである。発電機電圧上昇最大値は定格電圧の13.26%であり、約1.0秒後に定格電圧に回復し、1回のオーバーシュートの後、安定に定格電圧に制御されている。

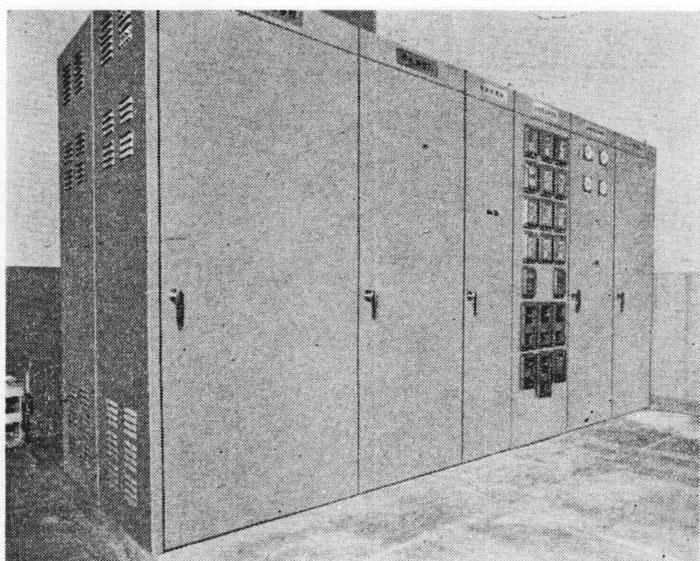
4.4 装置の構成

第21図は三相六鉄心形磁気増幅器を使用した磁気増幅器形自動電圧調整装置のキュービクルであり、界磁開閉器キュービクル、界磁調整抵抗器キュービクルと列盤としたものである。自動電圧調整器キュービクルは向かって右側からの3面である。

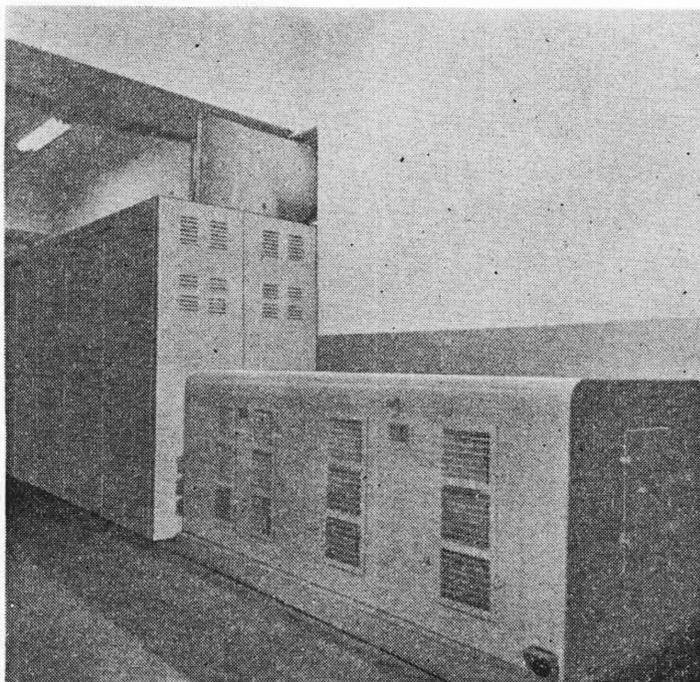
高周波発電機セットは単独設置を標準としている。第22図はドックハウス形のカバーに収納された高周波発電機セットである。

4.5 適用

磁気増幅器形自動電圧調整装置は1956年以来、約60台が製作されている。本装置が適用された発電機の総容量は3,272 MVAに達し、8,350 MVA・年の運転実績を持っている。磁気増幅器形自動電圧



右より自動電圧調整装置(3面)、界磁開閉器(1面)、界磁調整抵抗器(2面)
第21図 37 MVA 水車発電機用励磁機廻りキュービクル



第22図 磁気増幅器形自動電圧調整装置用高周波発電機セット

調整装置は中小容量機への適用を主目的として開発され、そのため商用周波磁気増幅器を使用して装置を簡易化したものも多く製作されてきた。しかし最近では最大出力40 kWの大容量磁気増幅器も製作され、これまでに適用された最大容量機は、関西電力株式会社、黒部川第四発電所納、95 MVA、300 rpm 水車発電機である。また、タービン発電機用のものとしては、東北電力株式会社、新潟火力発電所納320 MVA 発電機用の装置がある。このように、磁気増幅器の適用範囲は大容量機にも拡張されてきているが、磁気増幅器形自動電圧調整器はHTD形に比べ装置が複雑となり、かつ多量に使用される整流器が高温多湿の環境では特性を害される危険が多いので、実際の適用に当たっては、その設置条件などを十分考慮して適用の可否を決める必要がある。

5. 複巻自励式励磁装置

5.1 特長

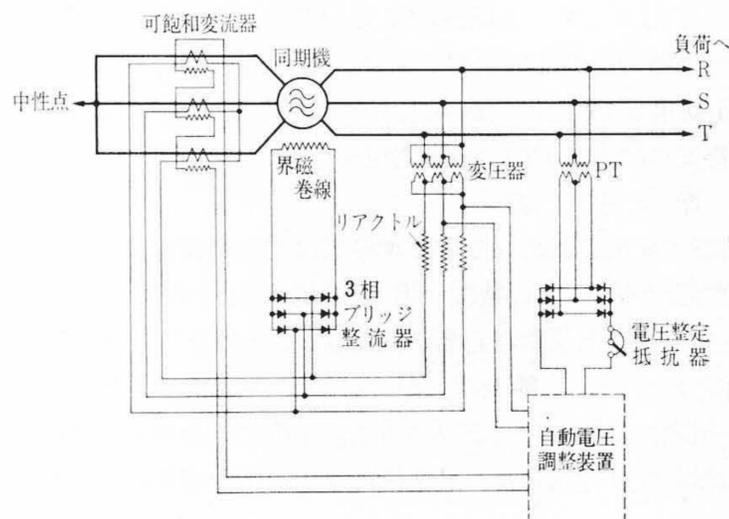
同期機の複巻自励式励磁装置は、同期機の界磁を自己の電機子端子電圧と電機子電流によって励磁する励磁装置であり、近年半導体整流器の進歩とともに、可搬形の発電機から、大容量のタービン発電機や水車発電機にまで広く適用されるようになった。本装置は従来広く励磁装置として使用されていた直流励磁機を必要とせず、かつ、複巻特性、すなわち負荷電流による発電機内部インピーダンス降下を、その負荷電流の正帰還によって補償する特性をもっているため、特に負荷急増にともなう過渡時にその特長を発揮する。

複巻自励式励磁装置の特長を要約すると下記のとおりである。

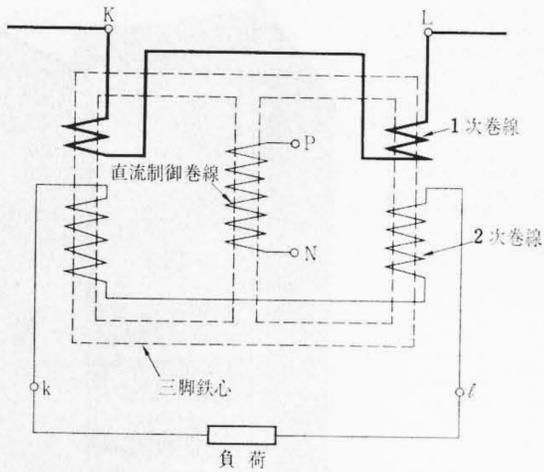
- (1) 変流器による直巻効果により負荷印加に対する電圧制御特性を改善することができる。
- (2) 装置が完全静止形であり、整流子がなく、ブラシは同期機のスリップリング用のみとなり、保安点検が容易となる。
- (3) 同期機の軸端に装備されていた直流励磁機が不要となり、軸方向の寸法が短縮できる。
- (4) 腐食性、爆発性ガスのある環境で、従来の直流励磁機に多いブラシ異常損耗問題がなく、かつ外気からの遮へいが容易となる。

5.2 動作原理

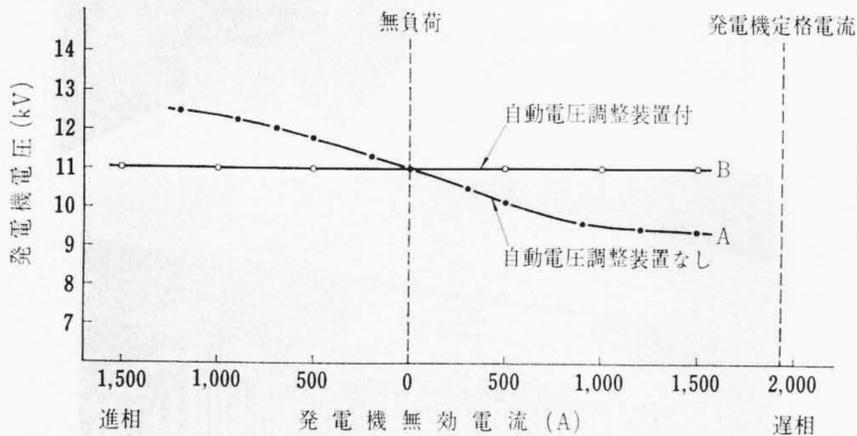
複巻自励式励磁装置は第23図に示すような回路で構成されている。回路を構成する主要部分は、変圧器、リアクトル、可飽和変流器、整流器、および自動電圧調整装置である。図の回路で、同期機が無負荷の場合の励磁は変圧器からリアクトル、整流器を介して界磁巻線に与えられる。同期機が負荷を負うと、負荷電流は可飽和変流器の二次巻線に負荷電流に応じた界磁電流を誘起し、無負荷界磁電流とベクトル的に合成されて、整流器を介して界磁巻線に与えられる。



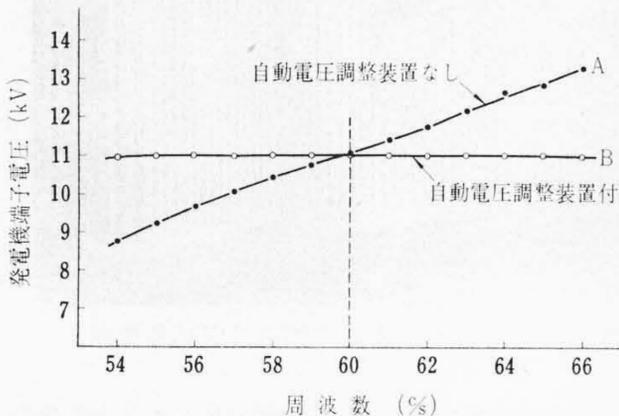
第23図 複巻自励式励磁装置接続図



第24図 可飽和変流器内部接続図



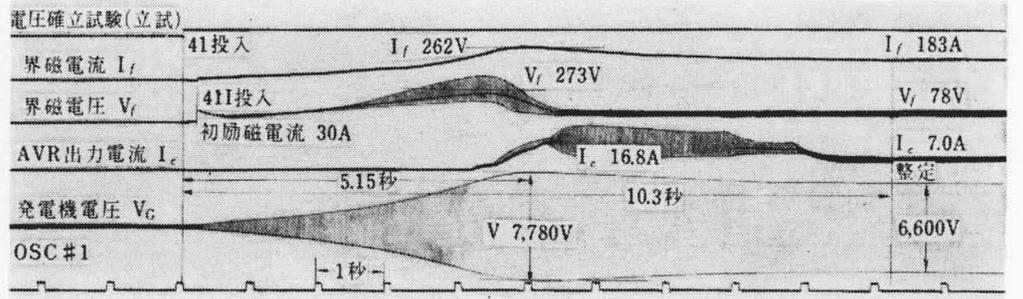
第25図 複巻自励式励磁装置の無効負荷特性



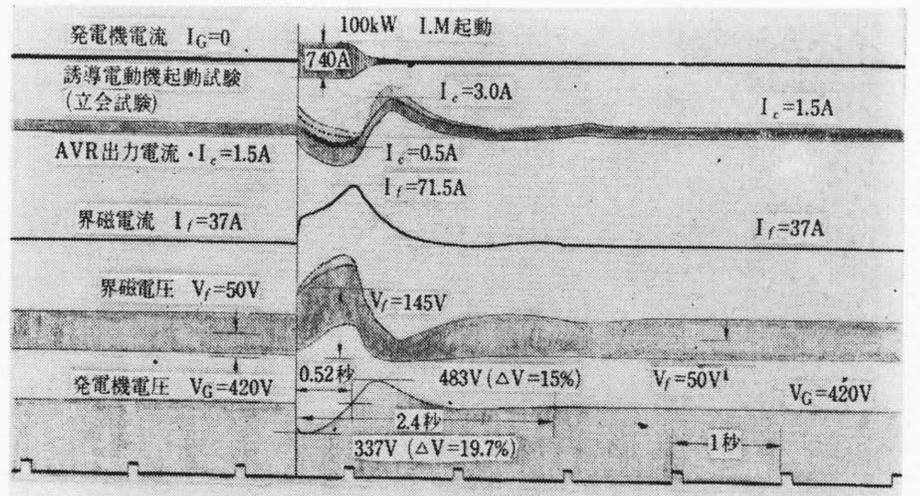
第26図 複巻自励式励磁装置の周波数特性

このように本装置は複巻特性を持っているので、理想的な同期機であれば、変圧器の二次電圧、リアクトルのリアクタンス、可飽和変流器の巻数比を適当に選ぶことにより、負荷状態に応じて必要な界磁電流を供給して端子電圧を一定に制御することができるわけである。しかし、実際の同期機には界磁磁束の飽和、温度による界磁巻線抵抗の変化、および回転子の速度変化があり、これを避けることができない。これらによって電機子端子電圧は違ってくる。したがって、精度のよい電圧制御を行なうためには、磁気増幅器を使用した自動電圧調整装置によって、電圧偏差に応じて可飽和変流器の直流制御電流を調整して界磁電流の制御を行なわなければならない。また、自動電圧調整装置を設けることによって、電機子端子電圧の整定値は電圧整定抵抗器によって所定の範囲に任意に整定できるようになる。

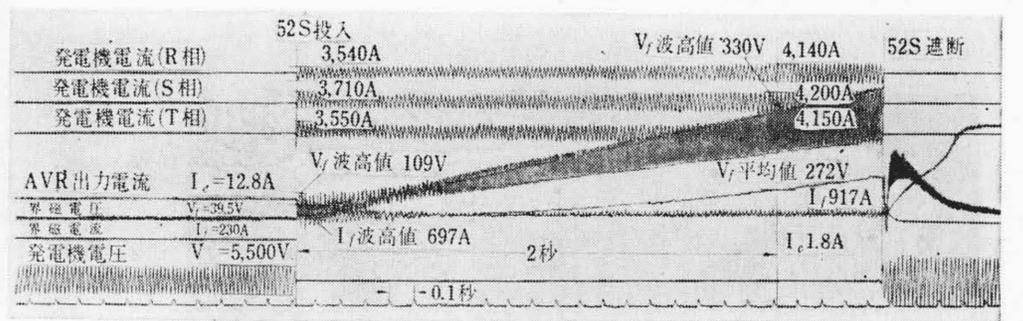
可飽和変流器は第24図のような構造の変流器であり、三相鉄心の外脚には交流一次巻線 KL および二次巻線 kl が巻かれており、中央脚には直流制御巻線 PN が巻かれている。可飽和変流器は直流制御電流によりその二次励磁リアクタンスが変化するので、複巻励磁特性を与える変流器としての働きと、発電機界磁に並列に接続され界磁電流を制御する可飽和リアクトルとしての働きを兼ね備えているものである。したがって、変流器を可飽和とせず、可飽和リアクトルを別に設ける方式と比較して構成部品を少なくすることができ



第27図 複巻自励式励磁装置電圧確立試験オシログラム



第28図 誘導電動機起動試験オシログラム
発電機定格 600 kVA, 電動機定格 100 kW



第29図 三相突発短絡試験オシログラム

るといった特長をもっている。

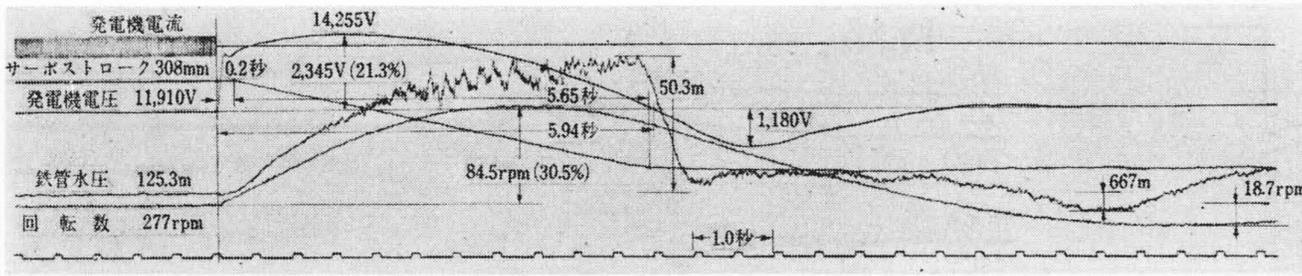
5.3 特 性

第25図は 37 MVA 水車発電機において実測した負荷特性であり、発電機定格の 77% の遅相および進相無効負荷に対する発電機端子電圧の関係を実測したものである。変流器による直巻補償は過複巻となる危険をさけるため不足補償となるように選ばれているので自動電圧調整装置がない場合の特性は約 14.5% の垂下特性となり、自動電圧調整装置によって制御誤差を 0.5% 以下としている。複巻自励式励磁装置の標準の制御誤差は $\pm 1\%$ 以下である。

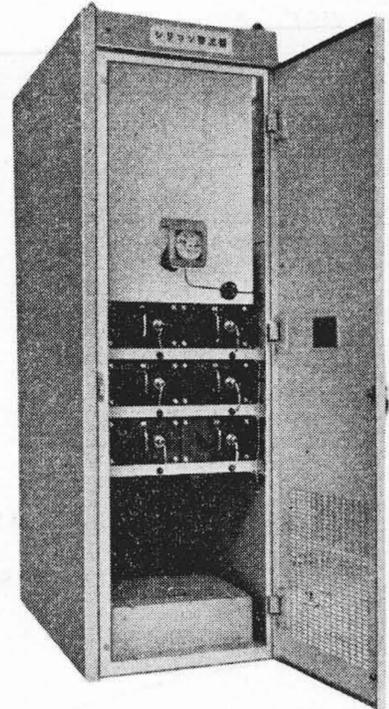
第26図は、上記発電機の無負荷時における周波数特性を実測したものである。 $\pm 10\%$ の周波数変化に対し、自動電圧調整装置がない場合の発電機電圧変動が約 $\pm 20\%$ であるに対し、自動電圧調整装置を設けることによりこれを 0.5% 以下に制御することができる。

複巻自励式励磁装置によって励磁される発電機は、起動時に初励磁電流を別電源から与えてやる必要がある。初励磁電流は発電機無負荷界磁電流の 10% 程度を起動時のみ与えてやればよい。第27図は 16 MVA 水車発電機の電圧確立特性のオシログラムであり、初励磁印加後約 4.5 秒で定格電圧に達している。

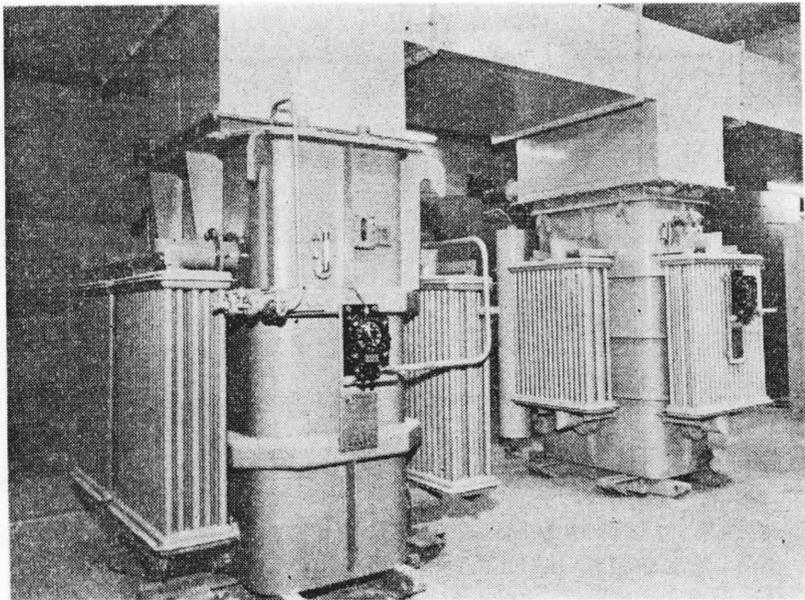
本装置は誘導電動機の直入起動時のような低力率負荷急印加時に、その複巻特性の特長をもっともよく発揮する。第28図は 600 kVA 所内用水車発電機で 100 kW 誘導電動機を起動した場合のオシログラムである。電動機の起動 kVA はほぼ発電機定格 kVA に相当するものであるが、界磁電圧は負荷印加瞬時に急増し、発電機端



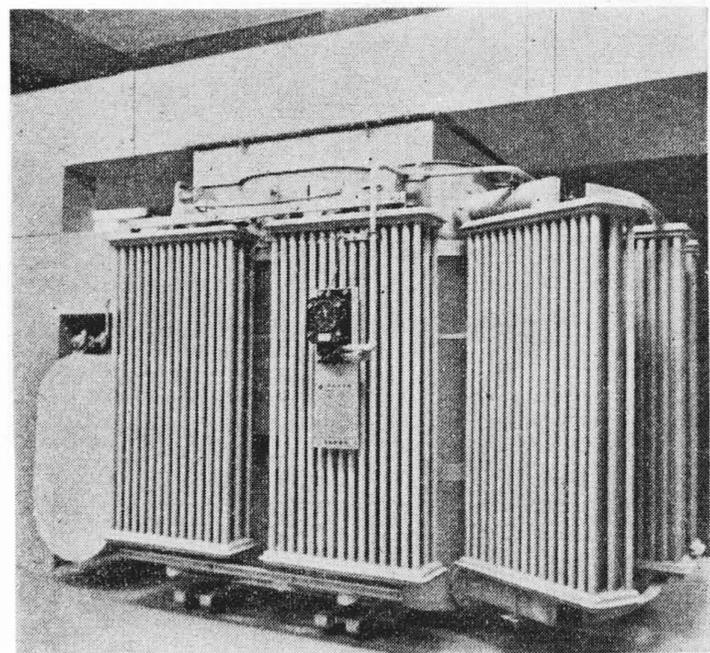
第30図 関西電力株式会社三尾揚水発電所 37 MVA 発電電動機
負荷遮断試験オシログラム



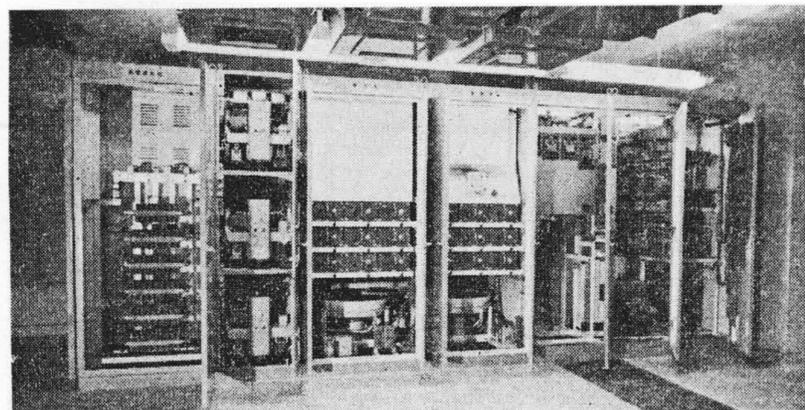
第31図 複巻自動式励磁装置用シリコン整流器
キュービクル



第32図 複巻自動式励磁装置用、変圧器(左)およびリアクトル(右)



第33図 複巻自動式励磁装置用可飽和変流器



関西電力株式会社三尾揚水発電所納 37 MVA 発電電動機用
第34図 複巻自動式励磁装置用制御キュービクル

子電圧は約 0.52 秒後に定格電圧に回復している。

このような複巻特性は発電機の電機子回路の短絡事故のような場合にも励磁を急増させる働きをする。第29図は 37 MVA 水車発電機を 50% 電圧から 3 相短絡した場合のオシログラムである。界磁電流および短絡電流は、励磁装置の直巻特性によってしだいに増加するが、可飽和変流器の飽和特性によって抑制されるので、2 秒後の短絡電流は定格電流の約 4 倍であり、機器を損傷するような危険な値にはならないことがわかる。

第30図は上記の 37 MVA 水車発電機の定格負荷遮断試験のオシログラムである。回転数上昇 30.5% に対し、発電機電圧上昇は 21.3% であり、5.94 秒で定格値に復帰している。自動式励磁装置では、整流器で発電機界磁を励磁しているので、負荷遮断のような場合にも界磁電圧を負極性として端子電圧上昇を抑制することができない。したがって、回転数変動の大きい水車発電機の場合には、復帰時間が回転励磁機の場合よりも長くなる傾向にある。

5.4 装置の構成

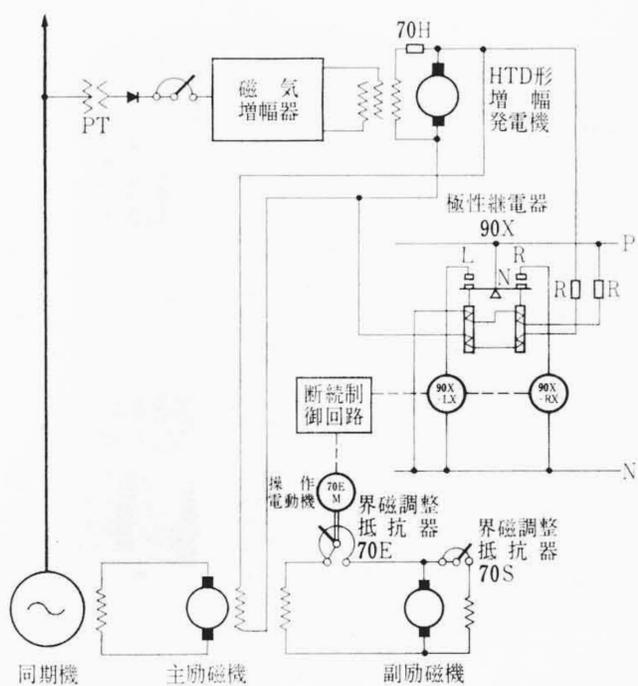
複巻自動式励磁装置を構成する部品のうち、整流器は最も重要な部品であり、小容量機を除いてシリコン整流器が使用されている。シリコン整流器は整流器に印加されることが予想される過電圧、過

電流に耐えるようその電流容量および逆耐電圧には十分の余裕のあるものが使用されている。異常電圧に対しては、その入力側および出力側にサージアブソーバおよびセレンアレスタを設けてこれを抑制し、過電流に対しては素子と直列にハイラップフューズを設けて整流素子を保護している。

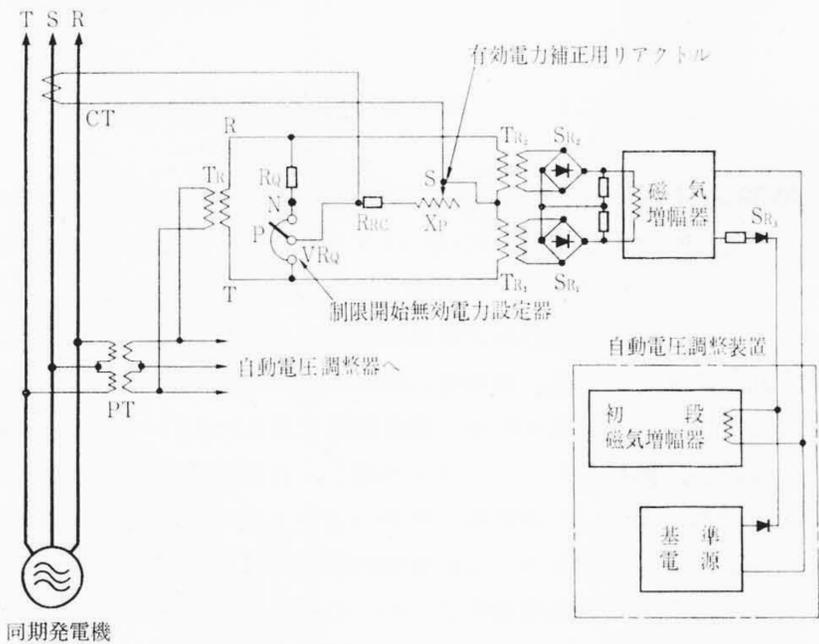
第31図は整流器キュービクルであるが、整流素子は図のようにトレイに組み込まれたものが使用され、かつ、並列枚数に1枚以上の余裕がとってあるので、万一運転中に整流素子に故障を生じた場合にも、運転を停止せずに故障した素子のみを交換することができる。

励磁装置用の変圧器、リアクトル、可飽和変流器は小容量機には乾式、大容量機には油入形のものを使用されている。第32図は油入形の変圧器およびリアクトルであり、第33図は可飽和変流器である。変圧器および可飽和変流器は一次、二次巻線間に静電遮へいがほどこされ、サージ電圧の移行率を少なくするとともに、二次端子を非接地とすることができるようにしてある。

自動電圧調整装置、界磁開閉器などはいずれも鋼板製キュービクルに収納され、整流器キュービクルとともに併置される。第34図は揚水発電所用の 37 MVA 発電電動機用の励磁装置制御キュービクルであり、右から3面が自動電圧調整装置キュービクル、次の2面が整流器キュービクル、続いて界磁開閉器キュービクル、界磁放電抵抗器キュービクルである。界磁開閉器および界磁放電抵抗器は電動機運転用の特殊なものが使用されているので、通常の場合よりはもっと小形になる。



第35図 HTD形自動電圧調整装置用界磁調整抵抗器追従制御装置接続図



第36図 低励磁制限装置接続図

5.5 適用

日立製作所では電力事業用複巻自励式励磁装置を1959年以来27台製作しており、適用された発電機の総容量は263.2 MVAとなり、575 MVA・年の運転実績を有している。その最大容量のものは関西電力株式会社、三尾揚水発電所納の37 MVA 発電電動機であり、励磁装置定格出力は230 kWであるが、さらに大容量の装置を製作することも容易である。タービン発電機用のものとしては、その保守の容易さから、工場用自家発電設備に多く適用されており、その最大容量のものは昭和電工株式会社、川崎工場納の20 MVA 発電機用のものである。

6. 付属装置

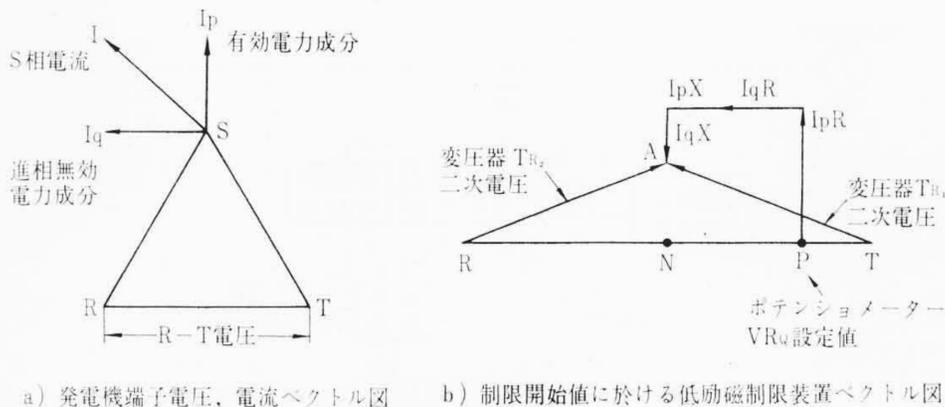
自動電圧調整装置には下記のような付属装置を取り付け、特殊な励磁制御を行なうことができる。

6.1 横流補償装置

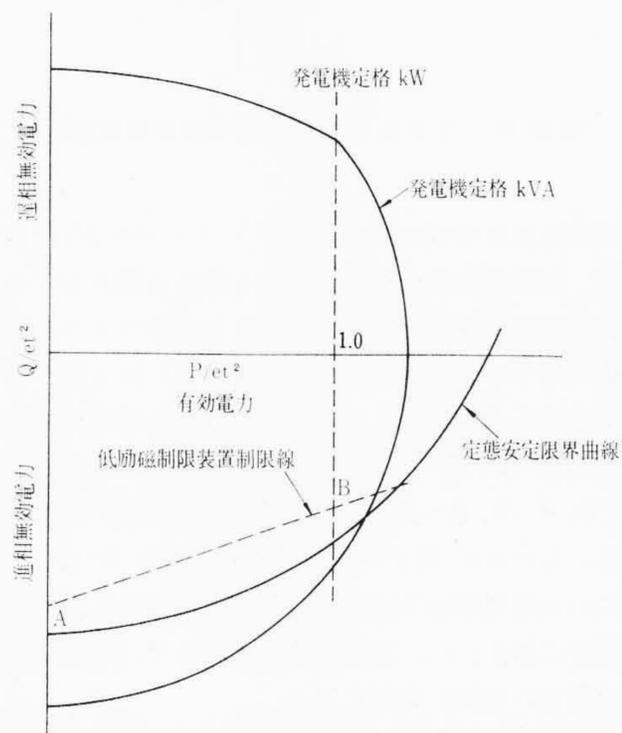
本装置は並列運転される同期機間の無効横流分担を調整する装置であり、補償度は変流器二次の無効電流3.5Aに対し、最大12%以下、1%ごとに調整できるように作られている。変圧器と発電機のユニット接続方式が行なわれる場合には、そのリアクタンス降下によって無効横流が抑制されるので、リアクタンス値に応じて補償度が選定される。

6.2 線路電圧降下補償装置

本装置は発電機が接続されている変圧器や送電線路のインピーダ



第37図 低励磁制限装置ベクトル図



第38図 発電機運転限界特性曲線 (Capability Curve) および低励磁制限装置設定値

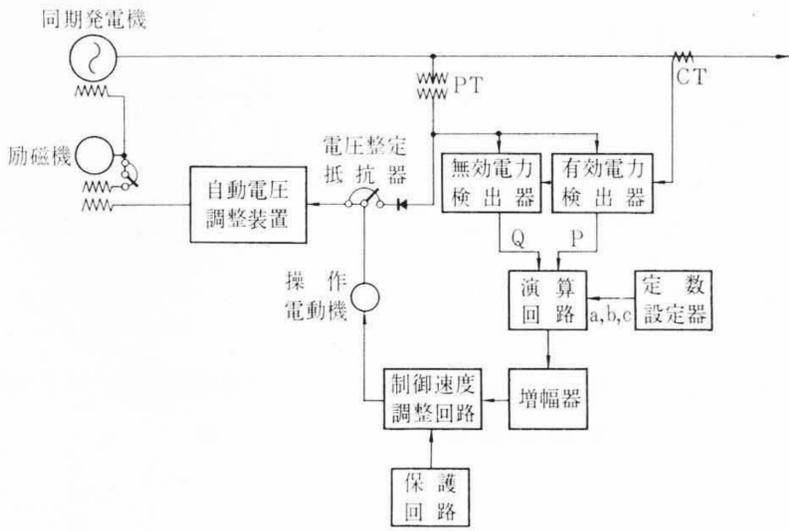
ンス電圧降下を補償する装置であり、自動電圧調整装置の計器用変圧器二次回路に線路インピーダンスを模擬したリアクタンスおよび抵抗を設け、これに変流器二次電流を与えることによって、線路電圧降下を補償する。補償効果はリアクタンスおよび抵抗降下12%以下、1%ごとに調整可能となっている。

6.3 界磁調整抵抗器追従制御装置

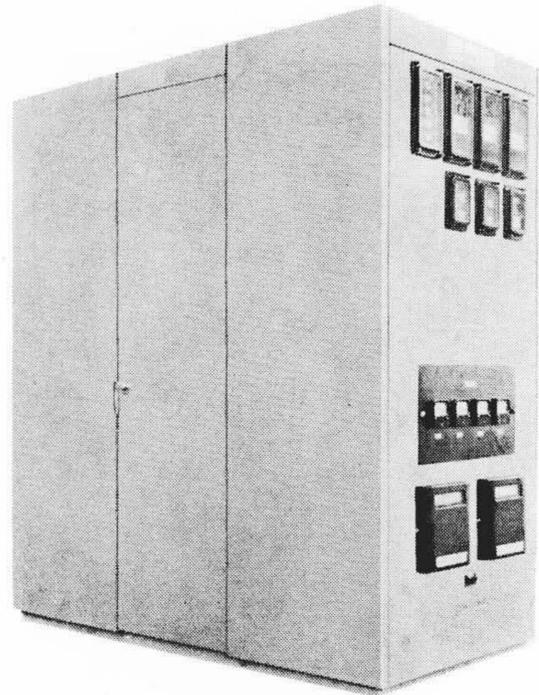
HTD形および磁気増幅器形自動電圧調整装置は発電機端子電圧の偏差に応じて速応的にHTDあるいは磁気増幅器から調整出力を与えるが、これを連続して出しておくことは装置の設計上不経済であり、かつ、自動電圧調整装置が突然運転を停止した場合に、発電機の励磁を急変させることになる。そのため、界磁調整抵抗器を自動電圧調整装置の動作に追従して自動操作し、自動電圧調整装置の出力が常時は、ほぼ零となるように制御するのが本装置の目的である。第35図はHTD形自動電圧調整装置用の追従制御装置の接続図である。HTDの出力電圧を極性継電器 (90X) で検出し、補助コンタクト (90X-LX, または90X-RX) および、乱調防止用の断続制御回路を介して界磁調整抵抗器を電動操作する。磁気増幅器形自動電圧調整装置の場合には、増磁側と減磁側の磁気増幅器の出力電流の偏差を電流平衡形継電器によって検出して、界磁調整抵抗器を追従制御する。

6.4 低励磁制限装置

電力系統の増大にともない、軽負荷時に発電機が進相運転を行なう必要が起こるが、そのような場合には安定限界値以上の進相運転を行なわないように制限しなければならない。本装置は進相運転を安全に行なうために、発電機の励磁が安定限界値以下に減少しないよう制限する装置であり、第36図はその回路の接続図である。第36図の可変抵抗器 VR_Q のしゅう動子の位置 ϕ は、有効電力零の場



第39図 自動無効電力調整装置概略接続図



第40図 関西電力株式会社堺港火力発電所納自動無効電力調整装置キュービクル

合の制限開始進相無効電力値を決め、リアクトル X_b は有効電力の増加に従い、制限開始進相無効電力値を低める働きをする。

第37図は低励磁制限装置の動作原理を示すベクトル図である。電圧 $T \sim R$ に対する S 相電流による抵抗 (R)、およびリアクタンス (X) の電圧降下を、それぞれ有効電流成分、無効電流成分に分けてあらわすと第37(b)図のようになる。変圧器 T_{R1} 、 T_{R2} にかかる電圧はそれぞれ $A \sim T$ 、 $A \sim R$ となり、両電圧の偏差が磁気増幅器の入力として与えられるが、阻止用整流器 S_{R3} のため $A \sim T > A \sim R$ となった場合にのみ磁気増幅器出力が自動電圧調整装置の初段増幅器の基準電圧巻線に加えられ、基準電流を増加させ、発電機励磁を強めて進相無効電力の増加を抑制する。

第38図は低励磁制限装置の設定例を $P-Q$ 座標上に発電機の運転限界特性曲線とともに描いたものである。制限開始線は、まず可変抵抗器 VR_Q により A 点を、次いでリアクトル X_b のタップにより制限開始線の傾斜、すなわち B 点を設定することによって得られる。 A 点の設定範囲は変流器二次電流で零から $5A$ まで連続的に設定でき、傾斜は零から 40 度の間、 10 個のタップによって設定できる。なお、タービン発電機のような非凸極機の場合には、一般に定態安定限界によって決まる進相無効電力よりも、電機子端部鉄心過熱による限界値が低くなる場合が多いので、それを考慮に入れて制限開始線を選定する必要がある。

6.5 自動無効電力調整装置

電力系統の送電方式として、従来はその系統運用の容易さから、定電圧送電方式が多く採用されてきている。しかし、電力系統の規模が増大するに従い、定電圧送電方式の場合、送電端に大容量の調相設備が必要とされ、また、送電端と受電端との間に流れる無効電流により送電損失が増加するなどの欠点が生じてくる。

自動無効電力調整装置は発電機の無効電力を一定値、あるいは電力の関数値に自動的に制御する装置であり、定電圧送電方式の欠点を改善する目的で使用される。

自動無効電力調整装置の制御基本式としては、一般に

$$Q = a + bp + cp^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Q ： 発電機無効出力

p ： 発電機有効出力

a, b, c ： 常 数

または(1)式の1次項を省略した

$$Q = a + cp^2 \dots\dots\dots (2)$$

が送電損失を少なくする目的で使用されている。

また

$$Q = a \dots\dots\dots (3)$$

すなわち、無効出力一定制御を行なわせ、設定値を給電指令所な

どからの遠方制御により、系統の電力供給状況に応じて設定する方法も行なわれている。

第39図は自動無効電力調整装置の概略接続図である。発電機の有効出力 (p) および無効出力 (Q) はダイナモメータ形の電力検出器および無効電力検出器により検出され、検出器に連動するポテンシオメータにより有効電力および無効電力に比例した電圧に変換して演算回路に加えられ、有効電力の自乗項はポテンシオメータを自乗関数抵抗として変換される。演算回路で前記の(1)~(3)式の演算を行ない、偏差があればそれを増幅し、自動電圧調整装置の電圧整定抵抗器を操作して発電機の無効出力を上記の関数式を満足する値に制御する。常数 a, b, c は配電盤の設定器によって設定されるのが普通であるが、給電指令所などからの遠方制御により設定することもできる。

日立製作所では、1956年以來8台の自動無効電力調整装置を製作しており、適用された発電機の総容量は959 MVA となり、1,883 MVA 年の運転実績を持っている。本装置を設けた最大容量の発電機は関西電力株式会社、堺港発電所納300 MVA タービン発電機であり、水力発電機としては中国電力株式会社、滝山川発電所納58 MVA 発電機がある。

第40図は堺港火力発電所納の自動無効電力調整装置の制御キュービクルの外観である。

7. 結 言

日立同期機用励磁調整装置は以上のべたとおり、精度において0.5~1% の高い定電圧保持能力を備え、動的応答特性は励磁系電圧速度で0.5~1以上を標準としているが、要すればさらに高いものとすることも可能で、2ないし4以上の実績を有している。しかも制御系は独特の二重負帰還乱調防止方式によってあらゆる運転状態で安定動作が確保されている。

これらのすぐれた特性は発電機の低励磁運転において相差角120度以上の動態安定度を可能とし、使用領域の拡大に貢献している。

本装置は異常時においても後備装置により手動装置に切り換えられ、主機運転の継続に支障のないような方式としてあるので、安心して同期機励磁制御の重要な任務を任せることができる。このことは総適用同期機容量と運転期間の実績が裏付けている。したがって今後とも国の内外を問わず各方面で電力系統運営に貢献することが期待される。