

同期機の自動励磁調整

Automatic Excitation Control of Synchronous Machine

広 吉 秀 高*

Hidetaka Hiroyoshi

内 容 梗 概

同期機の電圧調整は近年その精度とともに特に速応性が高いことが要求される。これを満足させるものとして、増幅型が開発され、日立製作所においては性能値高い HTD 型、さらに磁気増幅器型を多数納入し満足すべき実績をあげている。

また送電損失最小運転のため発電機無効電力調整装置なども納入し、系統の経済的運営に寄与させている。これらを含めて同期機の自動励磁調整につき、方式、特性、実績を述べる。

1. 緒 言

最近わが国の電力需給の重点は、その質の向上に向けられ、定電圧、定周波の保持に大きな努力が払われている。このため同期機の自動励磁調整は自動負荷周波数調整とともにきわめて重要なものとなり、それだけに近年大きな進歩をとげ、すぐれた特性が得られるようになった。

励磁調整装置は常時の電圧一定保持の目的のほかに、異常時の機器の保護、電力、電圧安定度の向上、送電線の高効率運転などの系統運営上に積極的な貢献をさせるよう精度と速応性がますます高いものとなっている。

2. 同期機の自動励磁調整装置

電力系統の電圧および無効電力の調整は同期機の励磁調整により行われる。これには種々あるが最も広く行われている系統運営方式は電圧一定運転であり、発電機および同期調相機は自動電圧調整装置を備えて定電圧制御を行う。また特殊な発電所では自動力率調整装置をもつて力率一定制御を行うところもある。さらに送電端無効電力を有効電力に常に一定の関係をもたせて運転し送電損失最小運転を目的とする自動無効電力調整装置なども使用される。以下これらについて述べる。

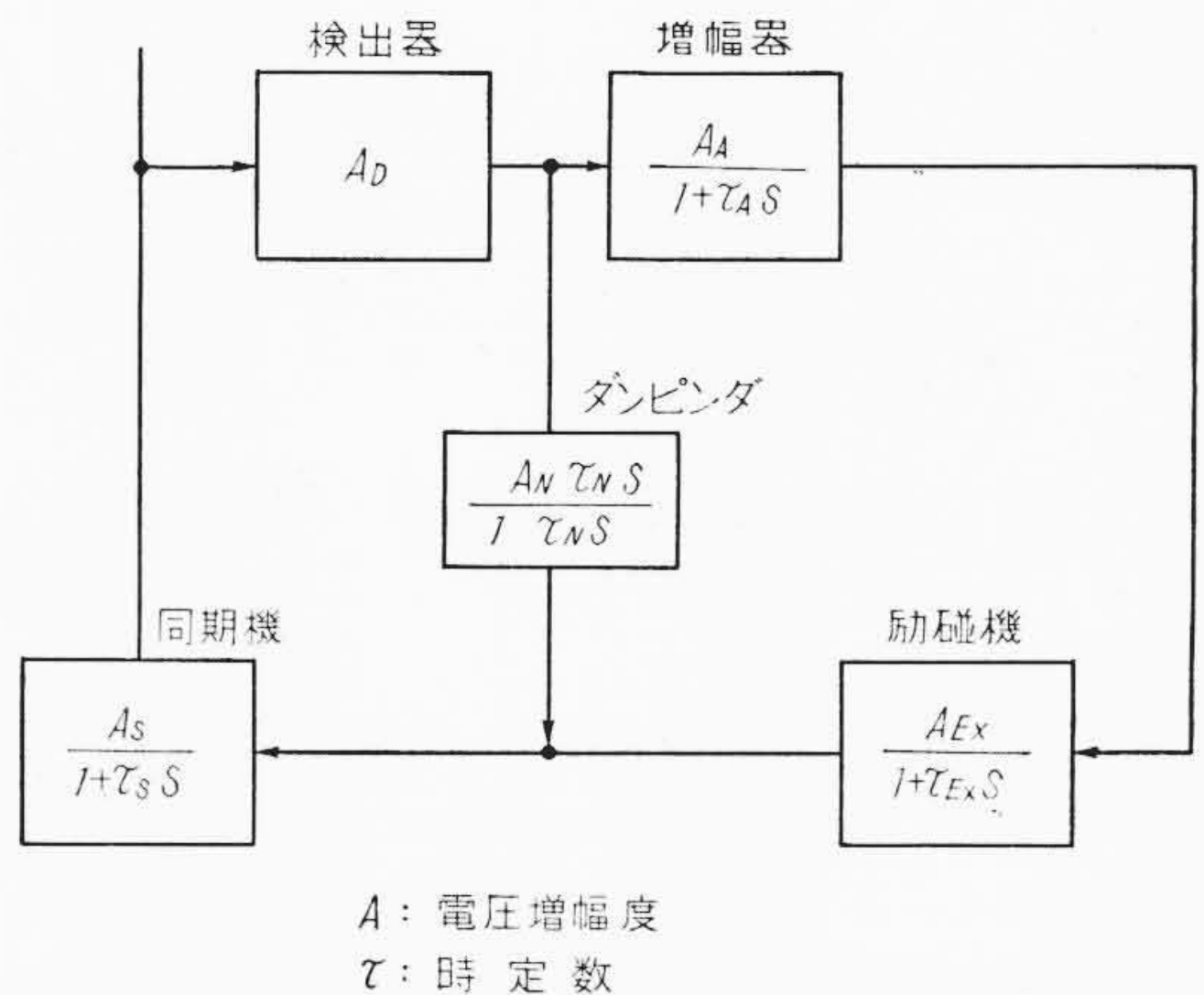
3. 自動電圧調整装置

自動電圧調整装置の第一の目的は電圧の一定値保持である。したがって高い精度ばかりでなく、急激大幅な擾乱に対しても短時間に整定値に復させるための高い速応性も兼ね備えねばならない。さらに短絡故障時の過渡安定度の向上⁽¹⁾、全負荷遮断時の機器に対する過電圧の軽減、無負荷送電線の充電容量の増大⁽²⁾、などの重要な特殊の目的から特に高い速応性が必要となる。

3.1 磁気増幅型電圧調整装置

上記の目的に沿うものとして広く実用されているもの

* 日立製作所国分工場



第1図 増幅型電圧調整装置制御系統図

は回転または静止型磁気増幅型電圧調整装置である。

3.1.1 増幅型調整装置の特性

増幅型電圧調整装置の解析には構成要素の伝達函数を定め、第1図の系統図として表わすことができる。これについて制御誤差、速応性などの特性を考えてみる。

(1) 制御誤差

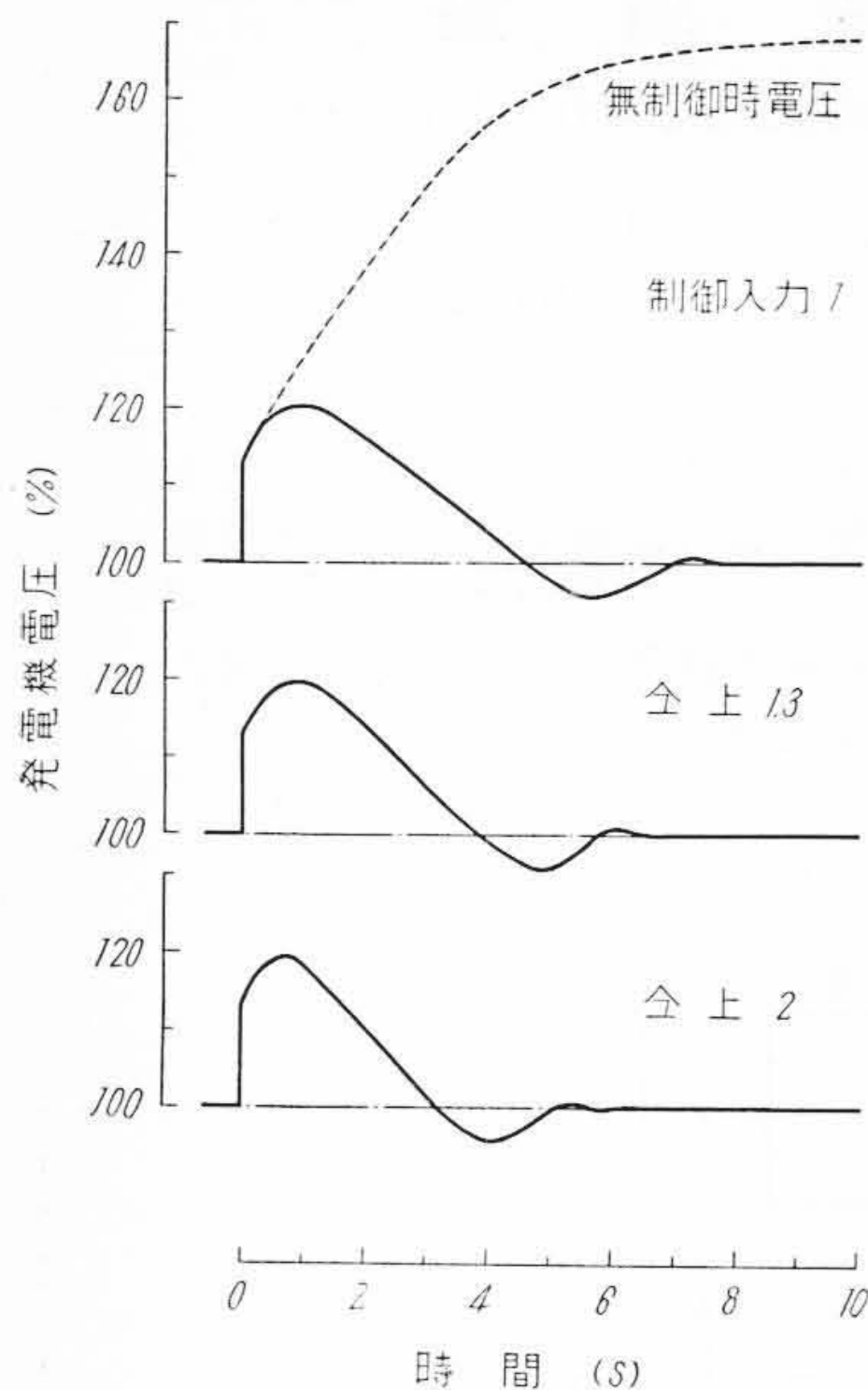
制御誤差 ε は総合増幅率を $\prod_{i=1}^n A_i = A_D \times A_A \times A_{Ex} \times A_S$ とすれば外部電圧擾乱 R に対し次のようになる。

$$\varepsilon = \frac{R}{1 + \prod_{i=1}^n A_i}$$

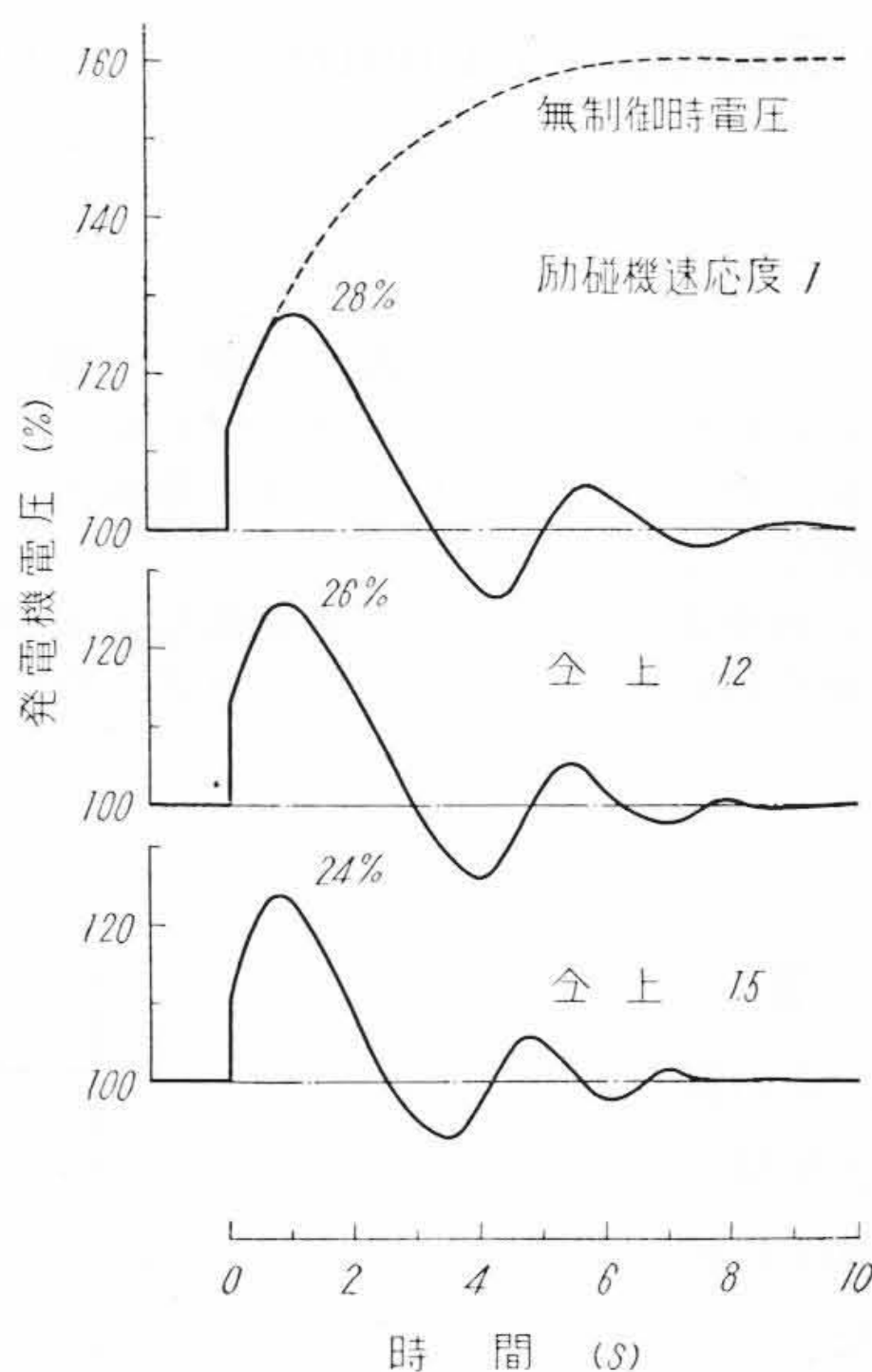
現在制御誤差は $\pm 1\%$ 以内が標準であり、上式より必要な総合増幅度が算定できる。しかし速応性の面からもよく検討して実際は最も適当な値に定められる。

(2) 速 応 性

速応性を高めるには各要素の時定数を小さく、したがって全系の総合時定数を小さくしなければならない。もし同一の増幅器を時定数短く使うため制御回路



第 2 図 励磁機制御入力と制御結果の一例 ($T_{do}' = 6.6$ 秒)



第 3 図 励磁機速応度と制御結果の一例 ($T_{do}' = 4$ 秒)

に抵抗を追加する方法をとれば、同時に増幅度も小さくなる。すなわち同じ型の増幅器では A_i/τ_i すなわち性能値は一定である。したがって速応性を高くすることは性能値を大きくすることに帰着する。しかし装置の良否を性能値のみで論ずることは各増幅器の特性が完全な直線性を備えた理想的な場合において正しい。ところが実際の機器では出力が大きくなるに従い飽和し最大値には限度がある。よって増幅器はその出力特性直線部の性能値を大きくし、飽和値が高くして広

い直線部をもつものとしなければならない。増幅器が 2 段以上直列接続されるときは前段出力を大きくし、後段の全出力範囲を十分制御できるようにしなければならない。

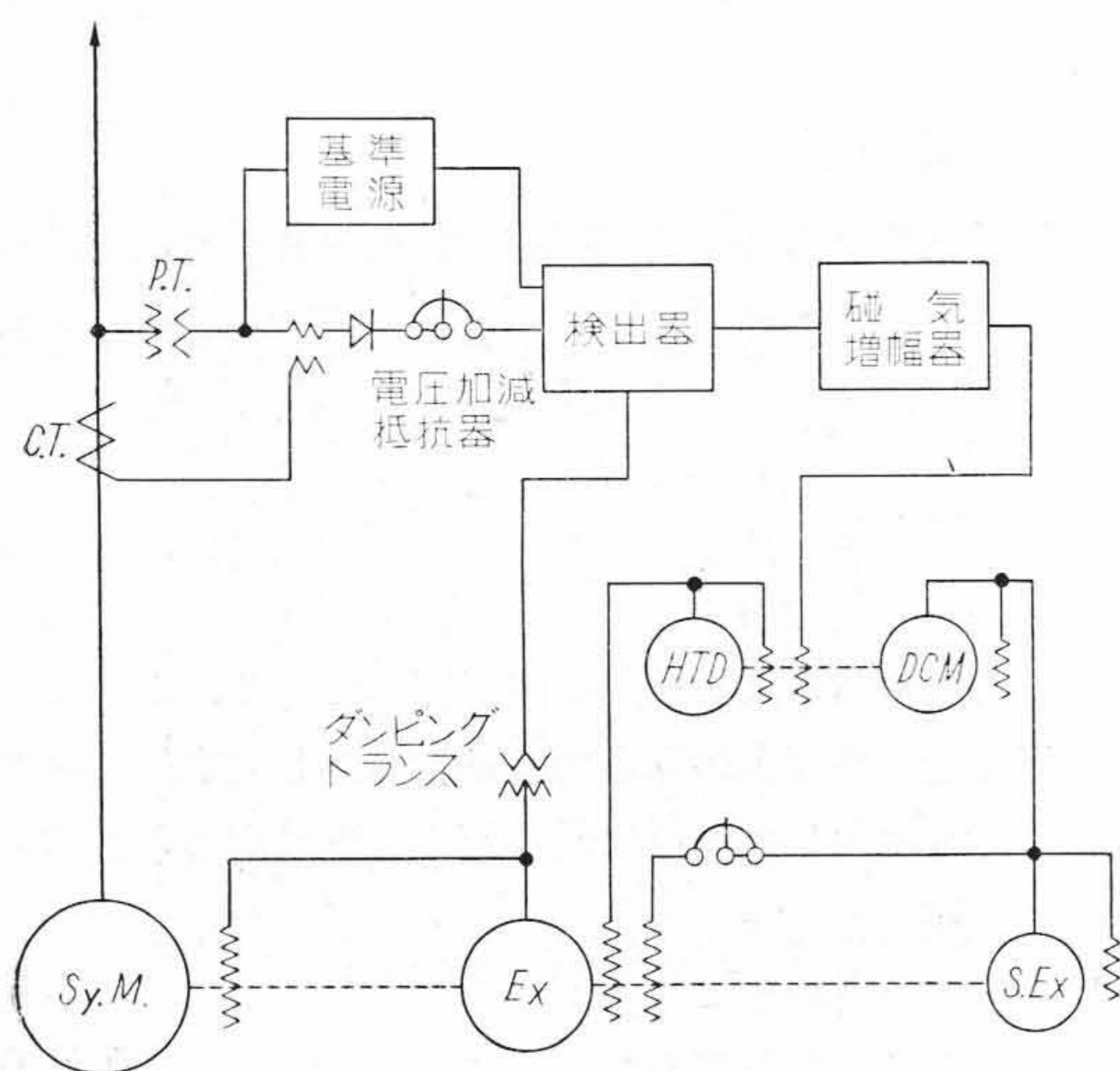
同期機の制御においては直前の励磁機特性が結果に最も大きな効果を表わす。励磁機制御入力と速応性の関係を水車発電機全負荷遮断時の電圧擾乱に対して解析した一例を第 2 図に示す。励磁機については電圧上昇率、励磁機速応度として制御要素としての特性が表わされている。これらと制御入力最大値の間には比例関係があるので、

励磁機速応度を定めれば必要な制御入力すなわち前段増幅器最大出力が定まる。励磁機速応度と装置の速応性との関係の一例を中容量水車発電機全負荷遮断時の制御経過により示したものが第 3 図で電圧最大値と安定時間にその効果がよくあらわれている。

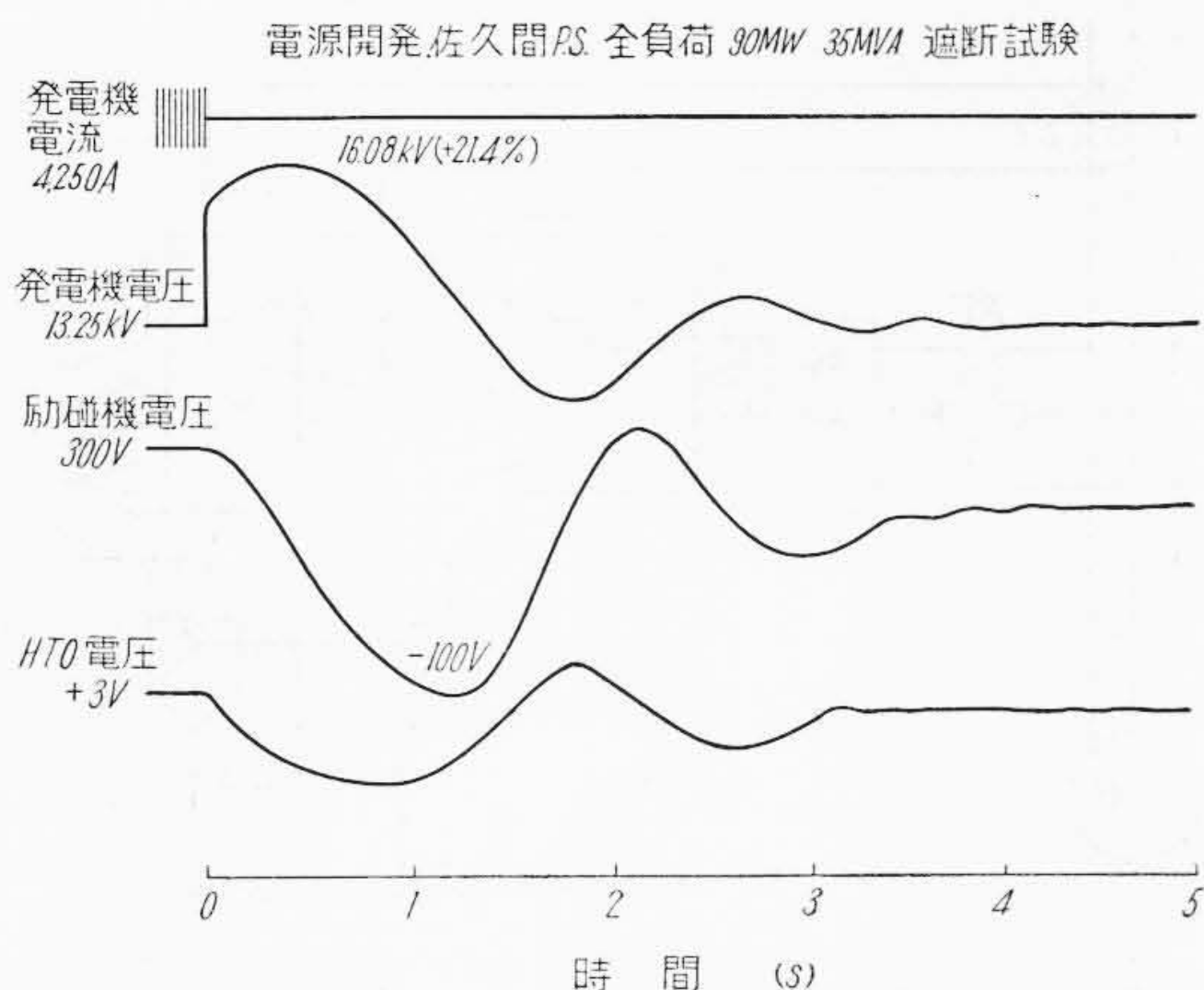
以上述べたとおり、高い速応性をうるためには要素の性能値を大きくしなければならない。励磁機、電力増幅器の大容量、大型化となり経済性と矛盾する。したがって要素の特性と配置の決定には慎重な検討を要する。かくして最近の大容量水車発電機においては、全負荷遮断において電圧上昇率 22%，安定時間 3.5 秒程度のすぐれた実績を収めるまでになっている。

3.2 HTD 型および磁気増幅器型自動電圧調整装置

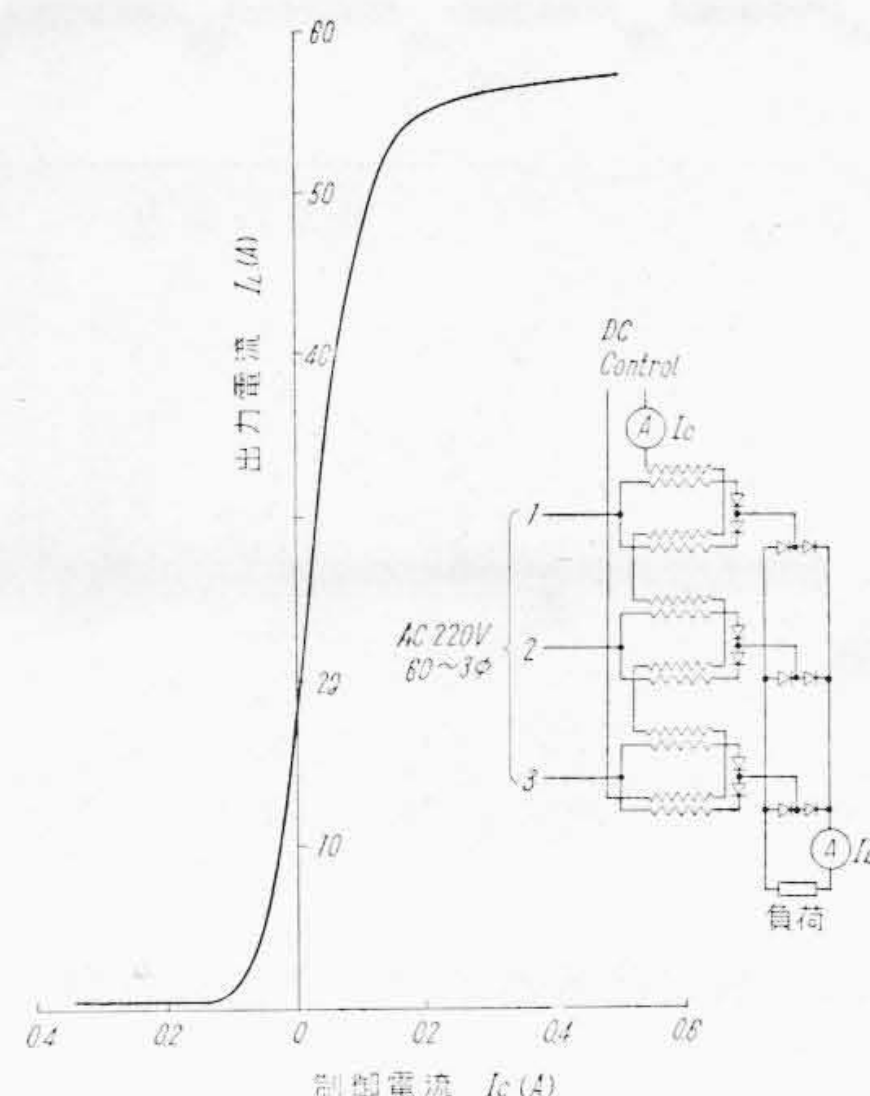
日立製作所においては終戦後本方式を開発し、主増幅機として HTD を使用する HTD 型自動電圧調整装置をすでに 30 組、総容量 1,000 MVA 近く納入しすぐれた実績を収めている。その系統図を第 4 図に示す。HTD は分極型として時定数を短くし、性能値をいつそう大きく改善して、速応制御の実効をあげている⁽³⁾。この代表的な例として電源開発株式会社佐久間発電所 93 MVA 水車発電機用は、この発電所の重要性から系統異常時でも装置に影響しないよう、HTD は副励磁機を電源とする直流電動機駆動とし、400 V 発電機を直結して装置の専用電源とする最も確実安定な方式としている。その全負荷遮断時のオシログラムを第 5 図に示す。また火力発電機の例として日本国有鉄道川崎発電所



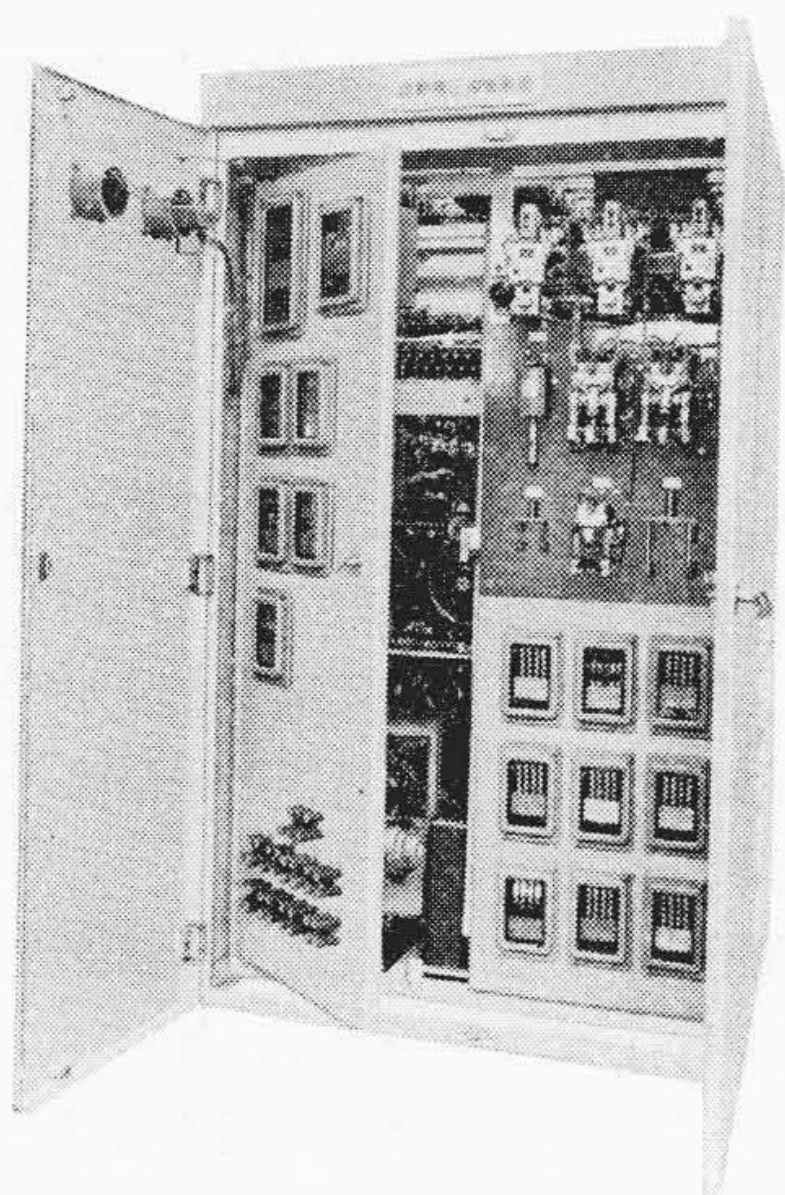
第 4 図 HTD 型自動電圧調整装置制御系統図



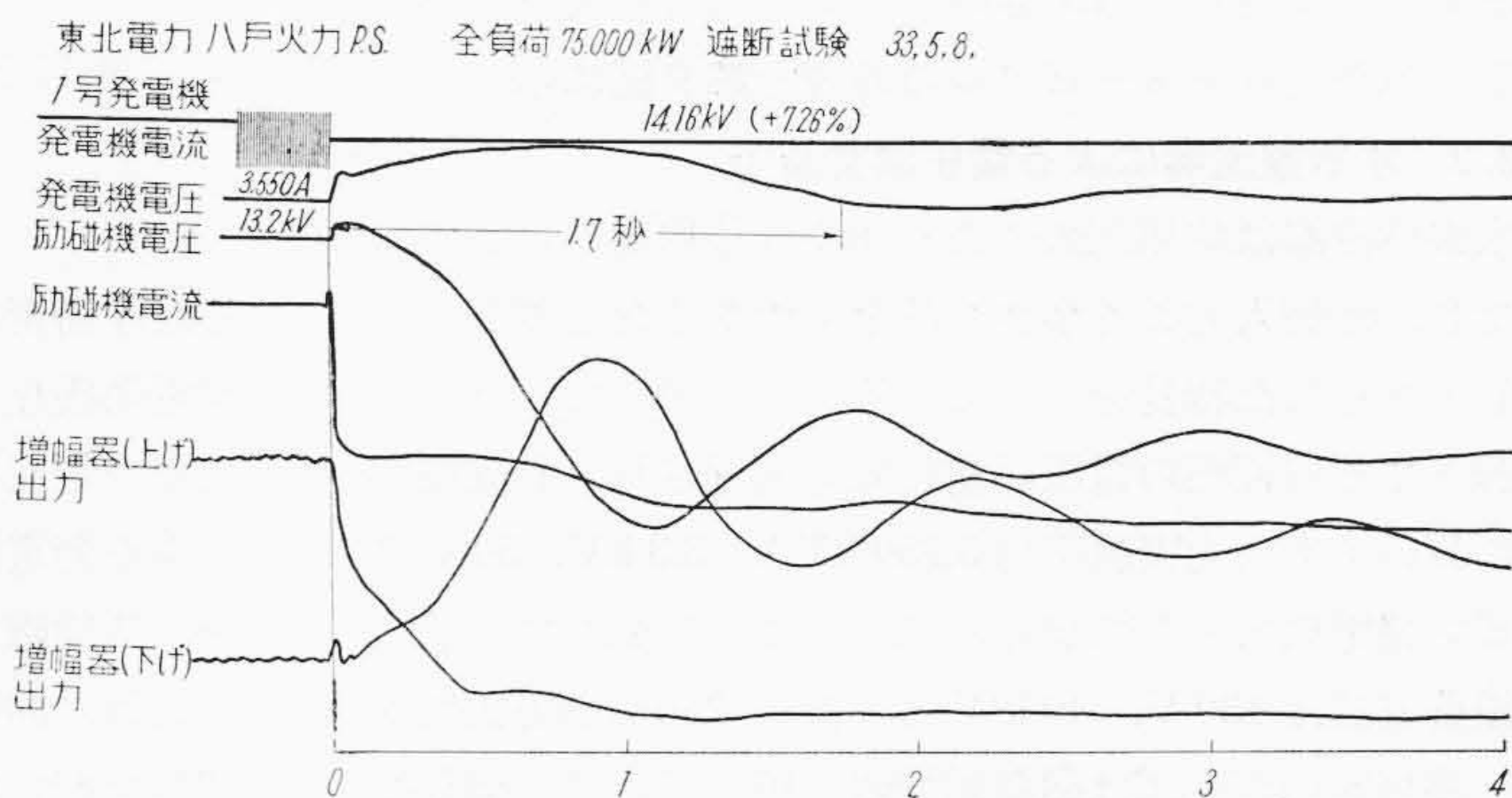
第5図 93 MVA 13.2 kV 60 $\sim$ 水車発電機全負荷遮断試験オシログラム



第7図 三相六鉄心式商用周波磁気増幅器接続および特性



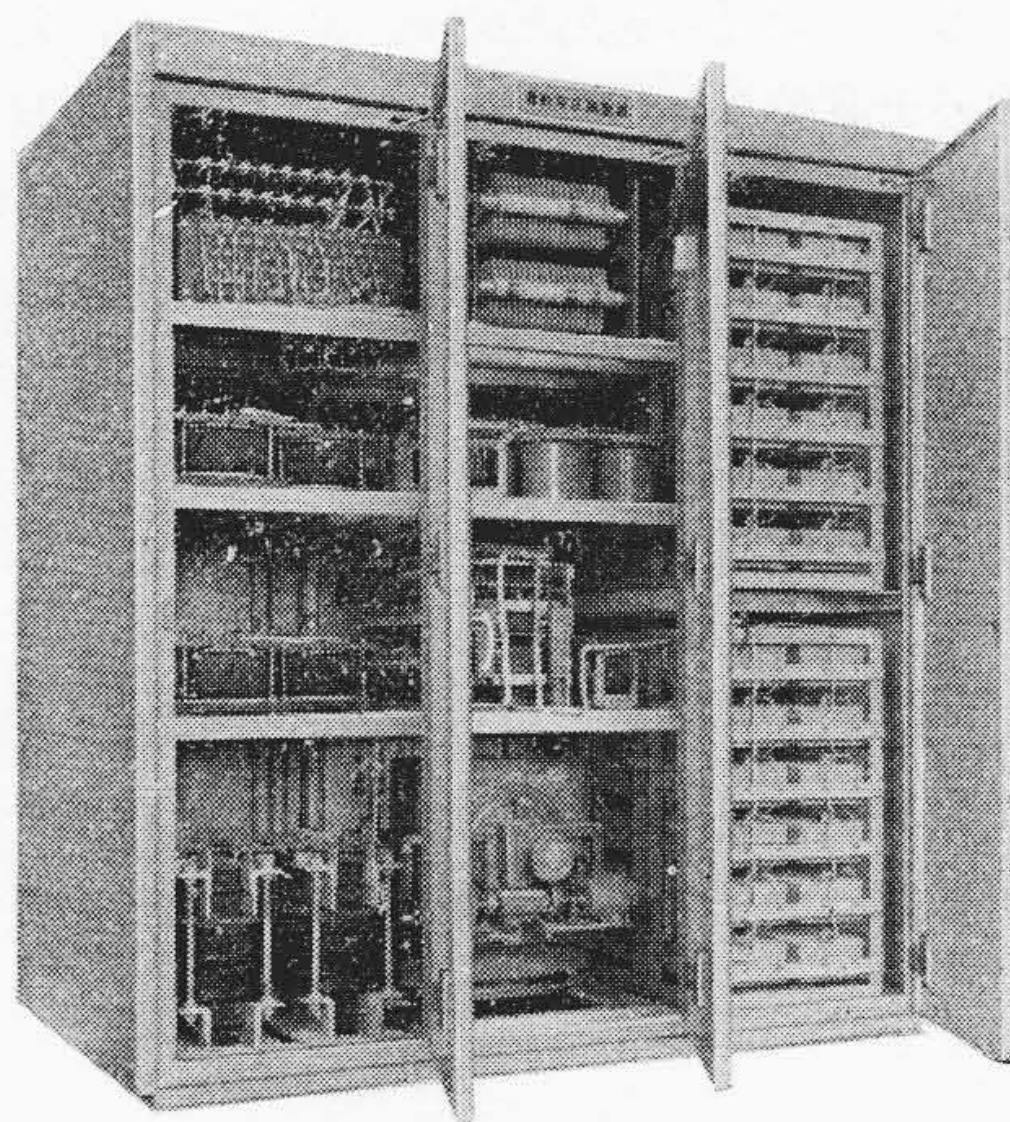
第6図 HTD 型自動電圧調整装置制御キュービクル



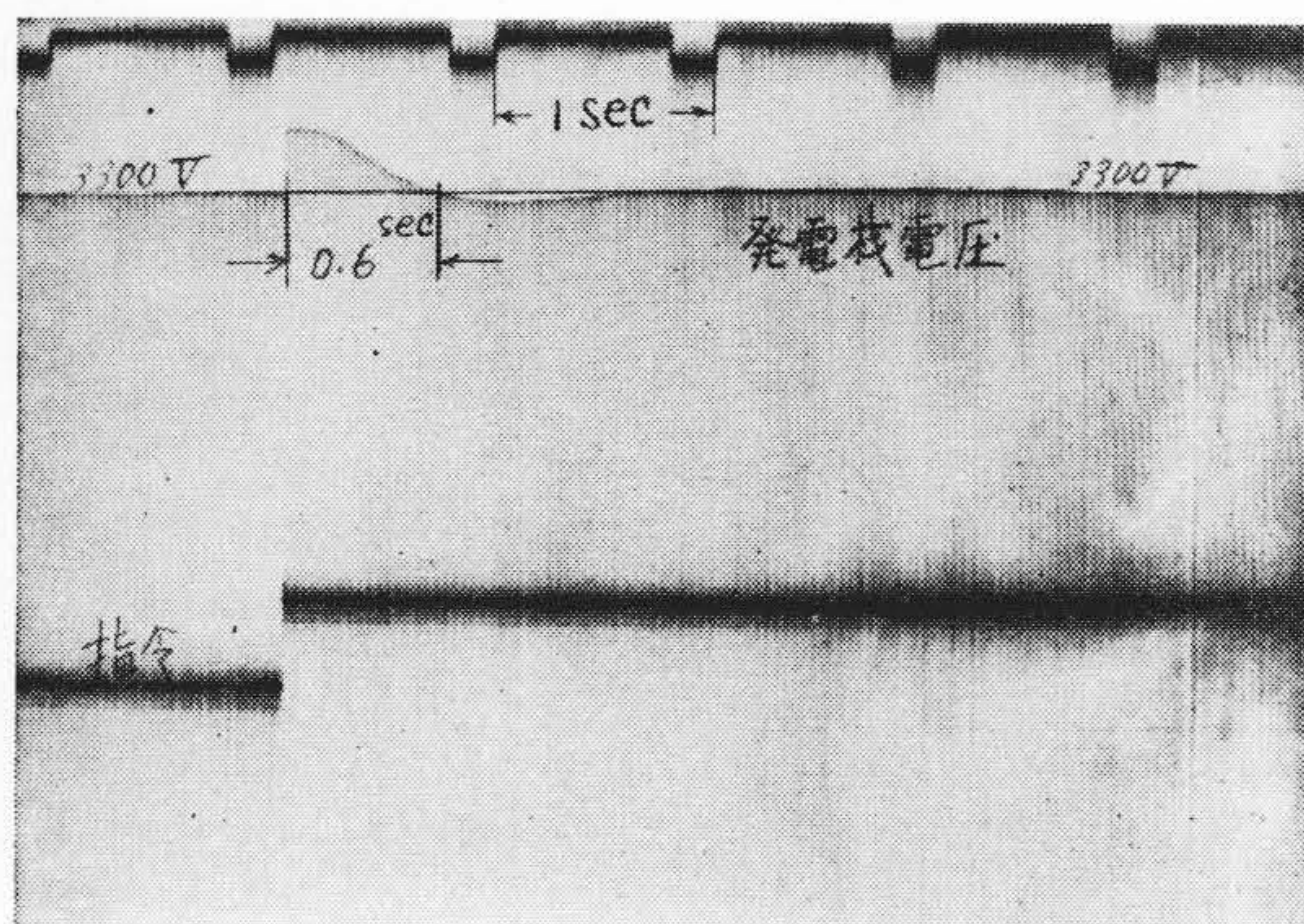
第8図 92 MVA 13.2 kV 50 $\sim$ ターボ発電機全負荷遮断試験オシログラム

63.157 MVA ターボ発電機では全負荷遮断時の過電圧をわずか9%におさえる好成績を収めてよく速応性を実証している。第6図に国鉄川崎発電所用 HTD 制御キュービクルの外観を示す。

最近の技術の進歩は大容量の磁気増幅器の製作を可能とした。すなわち商用周波の三相六鉄心式自己饋還型としてすでに最大出力 10 kW 以上のものを製作納入している。三相六鉄心式は大出力が得られるばかりでなく、性能値高く静止型であるなど多くの利点をもっている。その接続と特性を第7図に示す。電圧調整方式は HTD をプッシュプル接続の三相六鉄心式磁気増幅器 2 組にかえたほか HTD 型と変るところはない。本装置は昨年以來すでに水火力発電所用として 8 組、総容量約 200 MVA を納入運転に入っており、さらに続々製作中である。そ



第9図 三相六鉄心式磁気増幅器型電圧調整装置制御キュービクル



第 10 図 水銀整流器式電圧調整装置動作オシログラム

の例として東北電力株式会社八戸発電所 92 MVA ターボ発電機全負荷遮断時の制御結果を第 8 図のオシログラムに見ることができる。これより励磁機の速い応答と過電圧 7%，安定時間 1.7 秒のすぐれた特性が実証されている。調整装置キュービクルの外観を第 9 図に示す。

3.3 水銀整流器による電圧調整装置

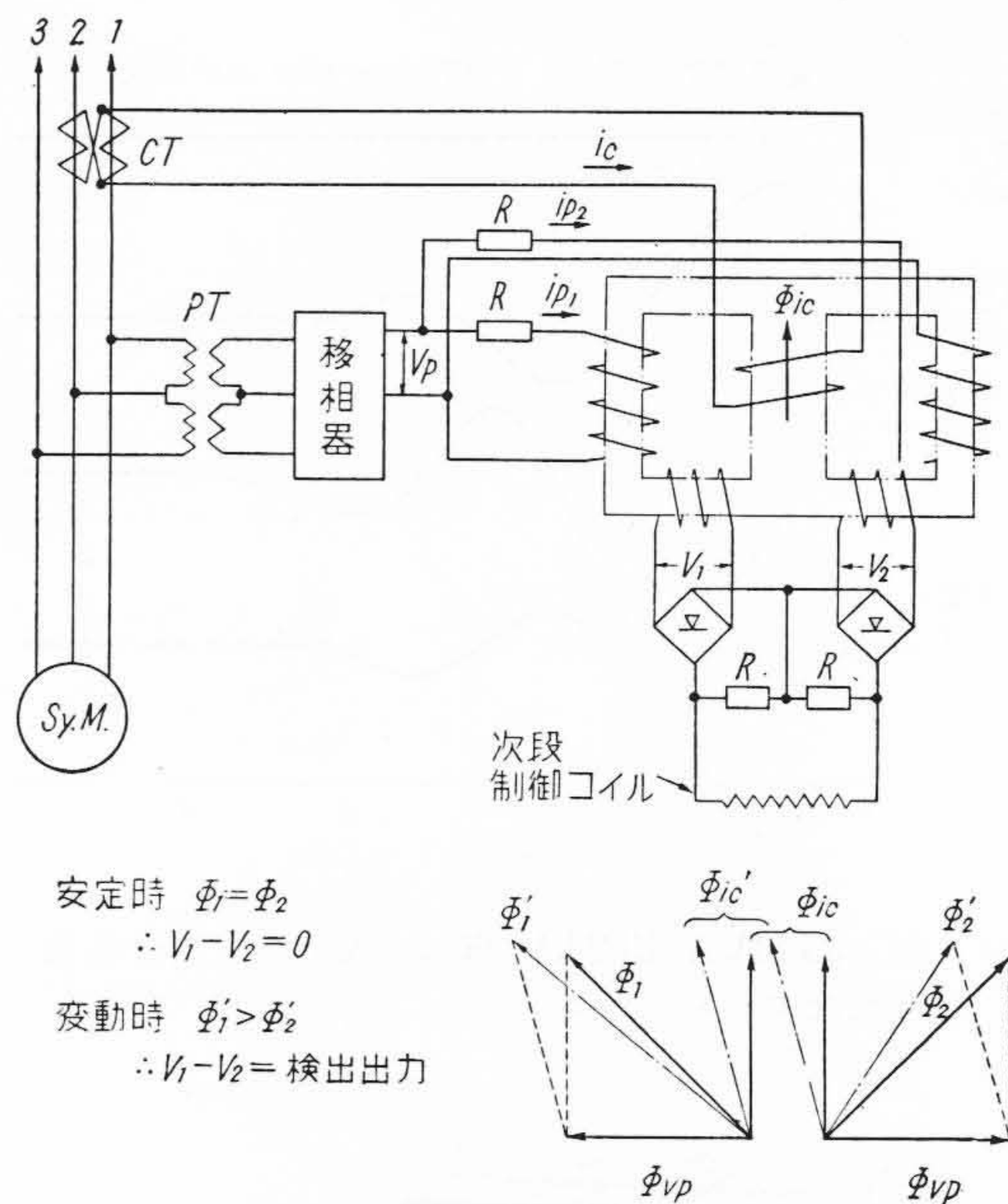
水銀整流器は位相制御により 0.005 秒程度の速い応答をなし、制御入力ごく小さく静止型であるなど制御要素としてすぐれた特長をもっている。したがってこれを励磁器とする同期機の電圧調整装置も開発され、日立製作所においても火力実験室用 3,750 kVA, 3.3 kV, 50 ㎐ タービン発電機用として製作、二年前より運転している。水銀整流器は 130 V, 40 kW とし格子位相制御方式である。移相器の制御には磁気増幅器を用いている。制御結果は発電機 $T_{ao'}$ が 6 秒程度であるにもかかわらず高い速応制御結果を得ている。動作オシログラムの一例を第 10 図に示す。

3.4 自動電圧調整の今後の問題

以上のとおり最近の速応性の向上は著しく、発電所完成時のガバナ試験として行われる全負荷遮断においては十分な好成績を収めている。しかし真の速応性は外部短絡故障時の過渡安定度向上を目的とする。また無負荷送電線充電の際手動または接点型電圧調整器による同期機充電容量は X_c (送電線容量インピーダンス) $= X_d$ が限度である。しかるに高い速応性の連続制御を行えば $X_c = X_l$ まで、すなわち充電容量ほぼ 50% の増大となることが知られている⁽²⁾。これらはいずれも送電方式、系統と一貫したものであり、調整装置に要求する特性をまず定めることが第一でこの要求を満足する装置として最も適当なものを製作するようになければならない。

4. 自動力率調整装置

系統電圧を調整する主要発電所でなく運転方式もでき



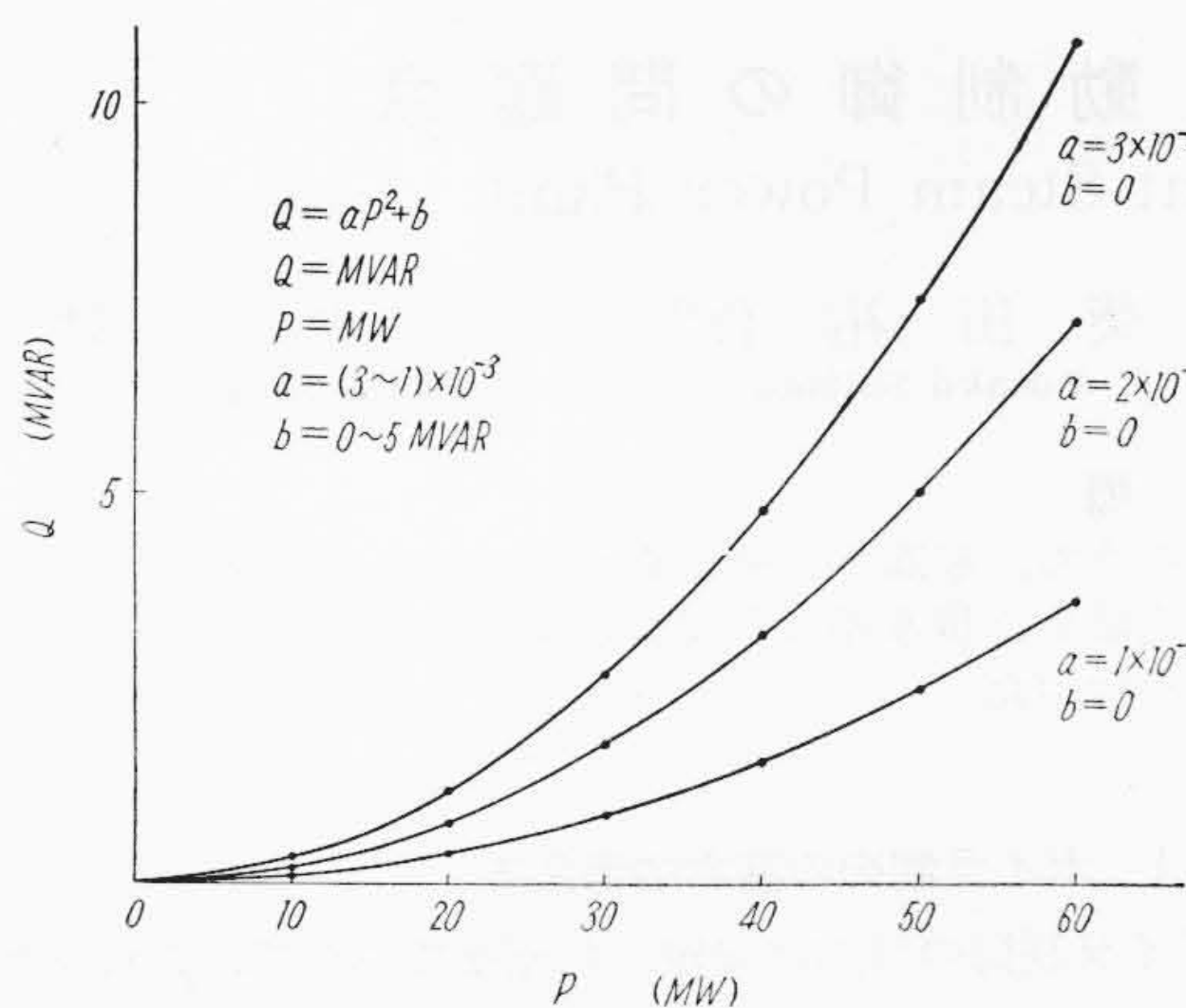
第 11 図 力率検出装置接続および動作原理図

るだけ簡素にする水力発電所または急激な変動負荷の同期電動機などでは無効電力を有効電力に常に比例させる力率一定運転を行えば負荷相応の無効電力を分担するので調整発電所の負担を軽くし、また自体の過励磁、過電流、低励磁などの危険を防いで安全である。

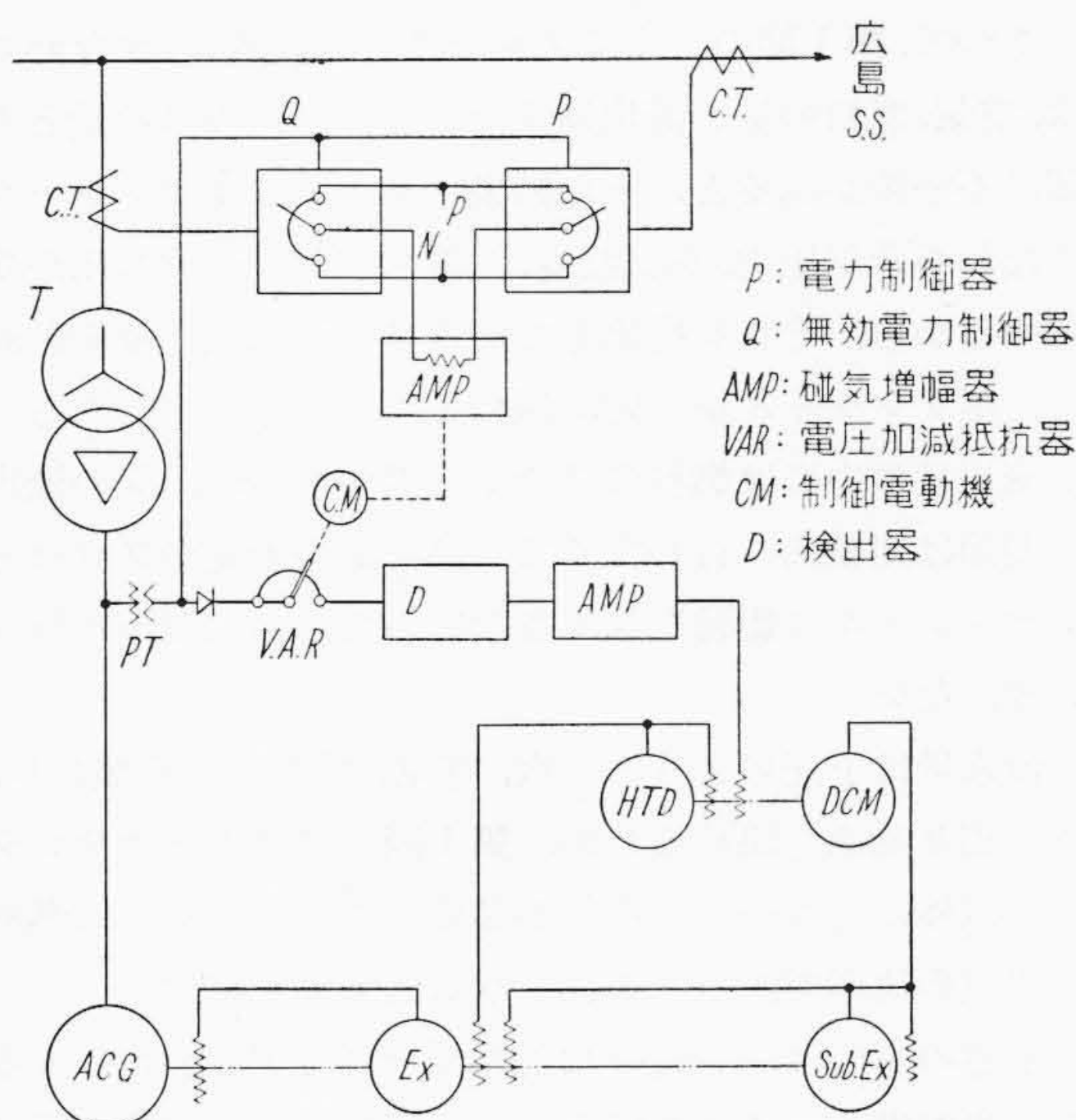
装置は同期機負荷変動による力率変動を検出して励磁調整を行い無効分を調整して力率を一定に保つ。したがって検出部が異なるのみで制御系は電圧調整装置と同一である。負荷変動緩慢な発電所などでは簡単な電磁型継電器を検出部とし界磁調整器を電動操作する方式が使用される。この方式として FDR 型継電器が使用される。急激な負荷変動ある電動機などに対しては速応性を要し、連続制御方式の増幅型が使用される。この場合の力率検出器の動作原理を第 11 図に示す。いずれの方式においても主機力率を整定範囲内のどの点に整定した場合でも電圧は移相器を介して検出器に与えられ、電圧および電流磁束は 90 度異相として平衡させている。したがって電流、電圧の大きさ、また有効分の影響なく無効分電流のみに応動して感度を高くしうる。FDR 型は無効分検出感度高く 90% 整定時継電器電流 5 A において力率検出感度は $\pm 1\%$ である。増幅型の場合の制御誤差も同等以上になし得、さらに速応性が高い。

5. 自動無効電力調整装置

山側の発電所と里側の受電変電所を結ぶ送電線の損失を最少にし送電効率を高める一方法として無効電力を有



第12図 無効電力調整装置特性図



第13図 無効電力調整装置制御系統図

効分と一定の関係に常に調整する送電方式がある。この関係は次の式で表わされる。

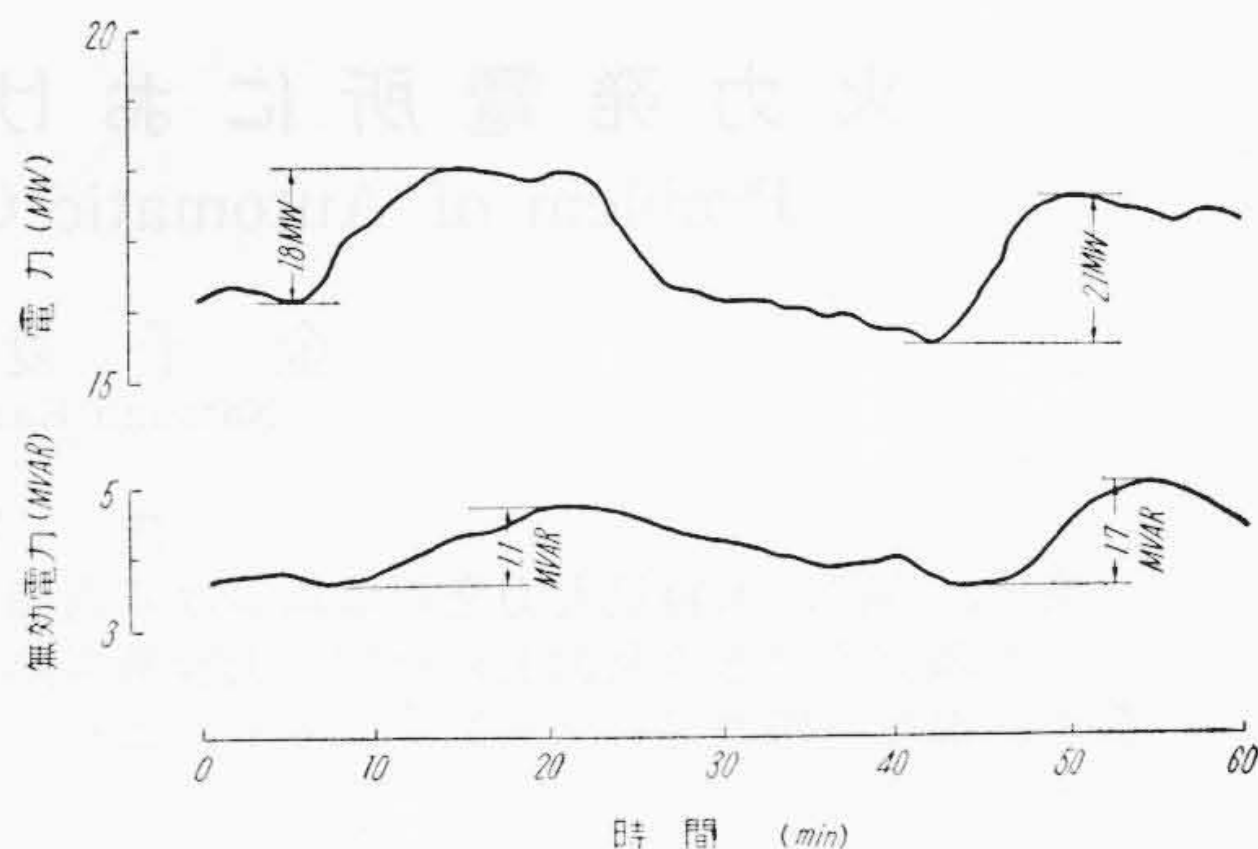
$$Q = aP^2 + b$$

Q : 無効電力

P : 有効電力

a, b : 定数

この調整装置の主系統は電圧調整系とし、別に専用の検出部において検出出力により電圧整定装置を制御し、整定値をかえて無効電力を調整する。この方式によれば常時は無効電力調整により損失最小運転をなし、短絡などの故障時は電圧調整装置として速応性を発揮し過渡安



第14図 無効電力調整装置動作記録

定度向上の効果が大きい利点をもっている。本装置は中国電力株式会社汐発電所 20 MVA 発電機 2 台および広島変電所向 110 kV 送電線 1 回線に適用された。本発電所の例では $Q = aP^2 + b$ の実数は第12図に記すとおりで、 P および Q 検出器はともに Q_6 型電子管式制御器とし、 P は有効電力値の自乗に、また Q は無効電力値にそれぞれ比例する抵抗値分布のスライド抵抗を内蔵しているので、これらをブリッジ接続して所定の無効分に対する偏差を検出させている。この検出出力はいつたん増幅され HTD 型電圧調整装置の電動式の電圧整定抵抗を操作している。第13図に系統図をまた第14図に制御結果の一例を示している。変動する有効分によく応答する無効電力調整の結果が現われている。

6. 結 言

同期機の自動励磁調整装置はまず定電圧の良質な電力供給を目的として出発しているが、さらに系統の電力、電圧安定度向上に、また経済的運営に積極的に大きな効果をもつようになってきた。日立製作所においては HTD 型、磁気増幅器型を多数納入しすぐれた速応性の実績をあげており、また無効電力調整装置をもつて発電機を制御させるなど不断の努力を重ねておりこれらが真価を発揮して電力界に貢献することが期待される。

参 考 文 献

- (1) P. L. Dandeno: Excitation System Response: A Utility Viewpoint T. A. I. E. E. 9, 1497 Feb. 1957.
- (2) Niels Knudsen: Overvoltages & Voltage Stability in the Operation of Long Unloaded Lines. ASEA Journal p. 147. 1952
- (3) 西: 最近の HTD とその応用 日立評論, 別冊 No. 8 p. 127 (昭 29)