

# 日立電気式調速機について

## On the Hitachi Electric Governor

小林 栄二\*  
Eiji Kobayashi

海老名 啓吾\*\*  
Keigo Ebina

小松 凱\*\*\*  
Gai Komatsu

### 内 容 梗 概

最近電力の質的向上のために水車用調速機として高感度、高速応性の電気式調速機が使用され始めたが本論文では日立製作所の標準形電気式調速機の速度制御方式、特性および昭和33年6月末運転に入った北海道電力芦別発電所および上川発電所納の現地試験結果について述べている。

## 1. 緒 言

最近水力、火力発電所の建設が急速に進められ需給状態は年々改善されてきたが、一方電力の質的向上の見地から水力発電所の水車用調速機に高感度、高速応性の調速機が必要となってきた。

電気式調速機は周波数の検出、増幅および復原を電氣的に行うため機械式調速機に比して高感度をうる事が容易であり、かつ剛性復原、弾性復原の調整も容易に行えることから最近各所で使用され始めた。

日立製作所では昭和32年10月関西電力株式会社笠置発電所に最初の製品3台を納入したがさらに研究、改良

第1表 電気式調速機納入一覧表

|    | 納 入 先       |          | 出 力, 台 数         | 運転開始<br>期 日              |
|----|-------------|----------|------------------|--------------------------|
| 1  | 関西電力笠置発電所   | 既設<br>改造 | 15,000 kW × 3 台  | 32-10末<br>33- 1<br>33- 2 |
| 2  | 北海道電力芦別発電所  | 既設<br>改造 | 10,600 kW × 1 台  | 33- 6                    |
| 3  | 東北電力上野尻発電所  | 新設       | 21,000 kW × 3 台  | 33- 7末<br>33- 9<br>33-10 |
| 4  | 中部電力川辺発電所   | 既設<br>改造 | 11,000 kW × 1 台  | 33- 8末                   |
| 5  | 北海道電力上川発電所  | 既設<br>改造 | 6,500 kW × 2 台   | 33- 8末<br>33- 9          |
| 6  | 北海道電力岩松発電所  | 既設<br>改造 | 7,500 kW × 2 台   | 34- 1<br>34- 1           |
| 7  | 中国電力滝山川発電所  | 新設       | 53,000 kW × 1 台  | 33-12                    |
| 8  | 北陸電力新中地山発電所 | 新設       | 40,200 kW × 2 台  | *34- 3<br>*34- 6         |
| 9  | 四国電力大森川発電所  | 新設       | 12,100 kW × 1 台  | *34- 9                   |
| 10 | 北海道電力岩清水発電所 | 新設       | 15,000 kW × 1 台  | *34- 5                   |
| 11 | 東北電力本名発電所   | 増設       | 31,000 kW × 1 台  | *34- 9                   |
| 12 | 中国電力新間の平発電所 | 新設       | 16,300 kW × 1 台  | *34- 9                   |
| 13 | 四国電力広野発電所   | 新設       | 35,000 kW × 1 台  | *34-12                   |
| 14 | 電源開発御母衣発電所  | 新設       | 128,000 kW × 2 台 | *35-10                   |

\* 印は運転開始予定期日

\* 日立製作所日立研究所

\*\* 日立製作所日立工場

\*\*\* 日立製作所国分工場

を加えて、昭和33年に至り十数台を完成した。これまでに納入されたものおよび納入予定のものを第1表に示す。本稿では標準形日立電気式調速機について述べる。

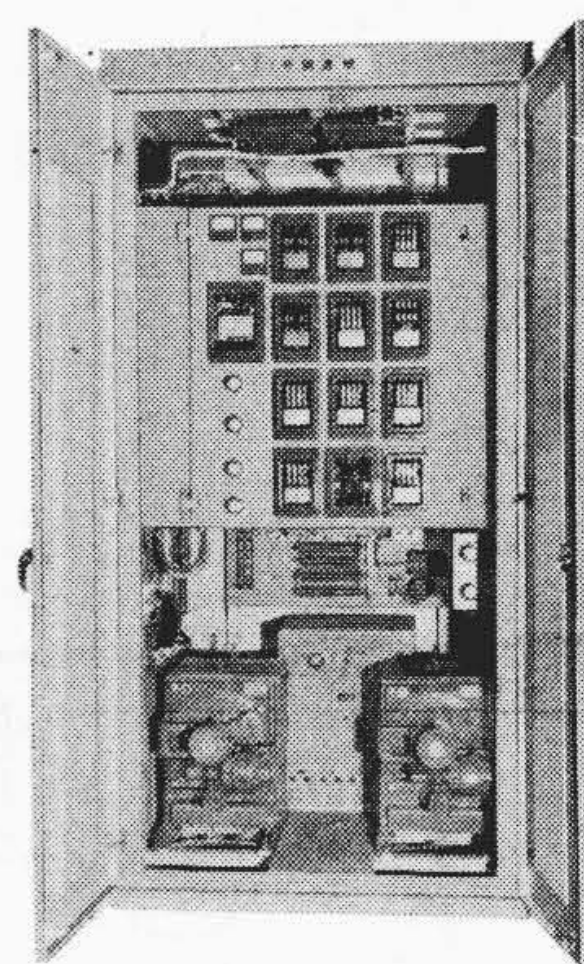
## 2. 速度制御方式

電気式調速機の構成要素は次に示すとおりであるが、これらのものは電気部分を内蔵するレギュレータ・キュービクルと、機械部分を内蔵するアクチュエータ・キャビネットにまとめられている。レギュレータキュービクルは主に配電盤室に、アクチュエータキャビネットは普通水車室に設置され、新設発電所の場合は二次配圧弁も内蔵し、ほぼ同じ大きさの水車操作盤と並べ、運転、保守に便利なものとなっている。

- (1) アクチュエータ発電機（水車発電機に直結）
- (2) 周波数偏差検出装置
- (3) 速応性磁気増幅器
- (4) 周波数整定装置
- (5) 速度調定率および出力整定装置
- (6) ダンピング整定装置
- (7) アクチュエータ・ソレノイド
- (8) 一次配圧弁および補助サーボ・モータ
- (9) 二次配圧弁および主サーボ・モータ
- (10) 配圧弁鎖錠および手動開度調整装置
- (11) 保護装置

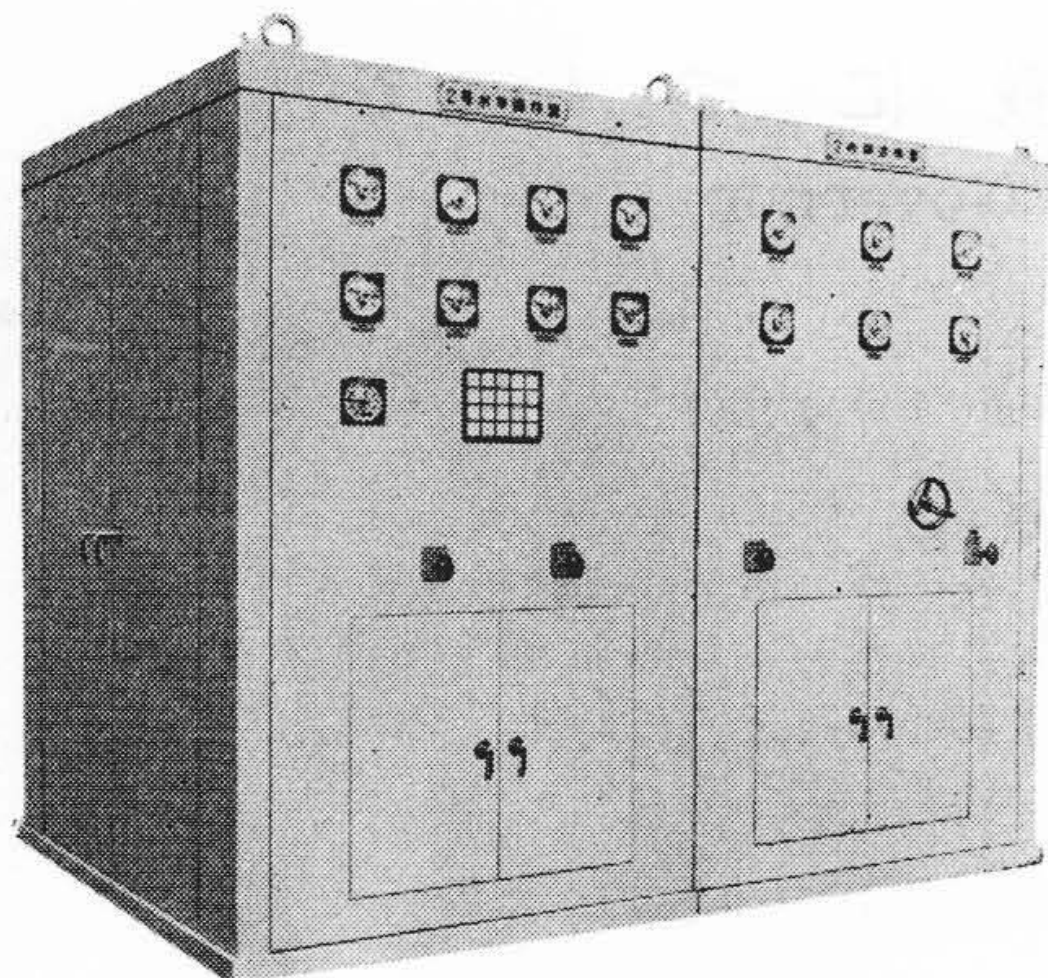
第1図にはレギュレータキュービクルを、第2図にはアクチュエータキャビネットが水車操作盤と並置された状況を示す。

電気系統図を第3図に、油圧系統説明図を第4図に示す。日立電気式調速機の動作原理は、水車発電機に直結されたアクチュエータ発電機を回転数すなわち周波数の発信器とし、この出

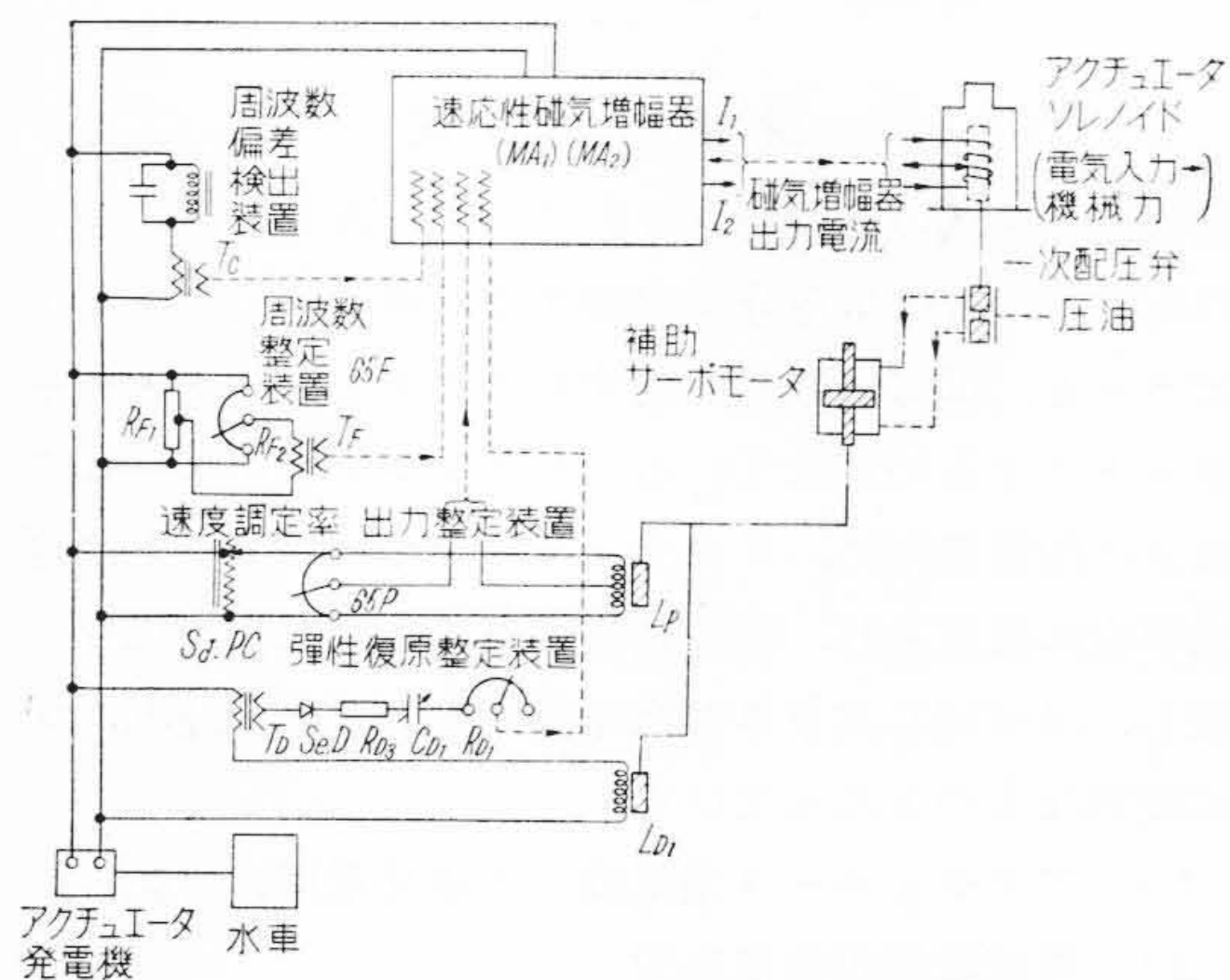


第1図 レギュレータ・キュービクル



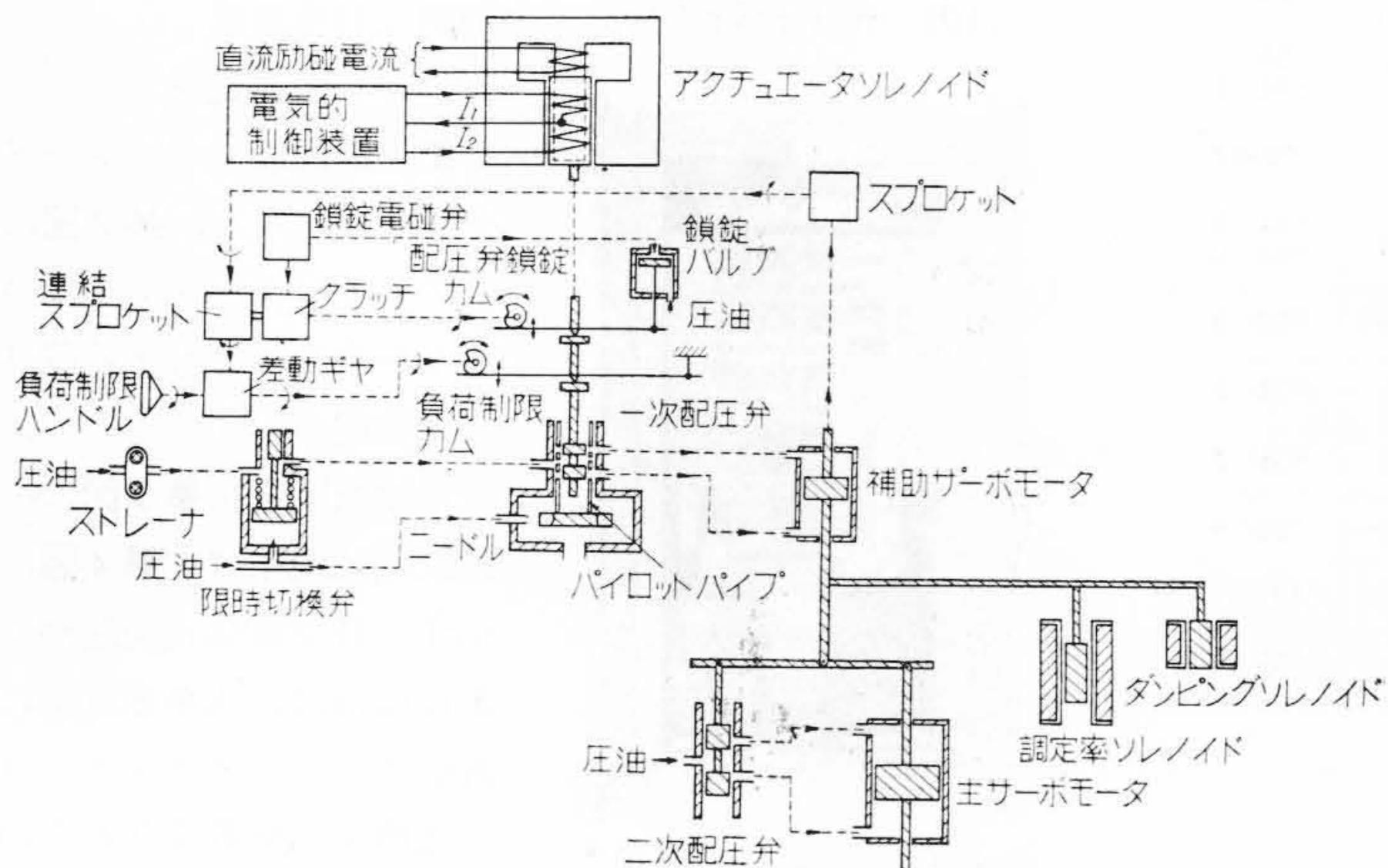


第2図 アクチュエータ・キャビネット



第3図 電気系統図

力電圧から LC 並列共振回路の検出装置によって周波数の偏差を検出してこれを速応性磁気増幅器で増幅する。さらにこの出力を次段のアクチュエータ・ソレノイドに送り機械的な変位に変換して、補助サーボモータを駆動



第4図 油圧系統図

するものである。一方補助サーボモータに直結された可変リアクトルによって速応性磁気増幅器にそれぞれ剛性復原、弾性復原を饋還して速度調定率、ダンピング特性をあたえている。別に周波数整定装置を設け運転周波数の整定、揃速操作を行わせる。補助サーボモータより主サーボモータさらに案内羽根開度に至る機構は従来の機械式調速機と同じであるが、アクチュエータソレノイドに直結された一次配圧弁はわずかな周波数変動に対し応動するようにパイロットパイプを常時ゆるやかに回転させている。

電気式調速機は周波数変化に応動するいわゆる調速機運転のほかに、電気回路の点検時に調速機を除外して案内羽根開度をそのときの開度に固定する配圧弁鎖錠（アクチュエータ・ロック）、配圧弁鎖錠後負荷制限装置を操作して案内羽根開度を任意の開度に調整する手動開度調整（ゲート・セッティング）の特殊運転装置を備えている。

保護装置としては交流、直流電源異常、およびアクチュエータ・ソレノイドの励磁コイル断線、さらに回転数上昇時に配圧弁鎖錠、手動開度調整装置を除外するための保護継電器を備えている。

### 3. 標準仕様

日立電気式調速機の標準仕様は次のとおりである。

- (1) 感度：0.02%（補助サーボモータまで）
- (2) 周波数整定範囲：+2～-4%間連続可調整
- (3) 出力整定範囲：0～100%間連続可調整
- (4) 速度調定率：0～5%間連続可調整
- (5) ダンピング：強さ 0～50%間切換可調整  
時定数 0～10 秒間切換可調整
- (6) 不動時間：0.1 秒以下（全負荷遮断時補助サーボモータまで）

### 4. 各部の動作原理とその特性

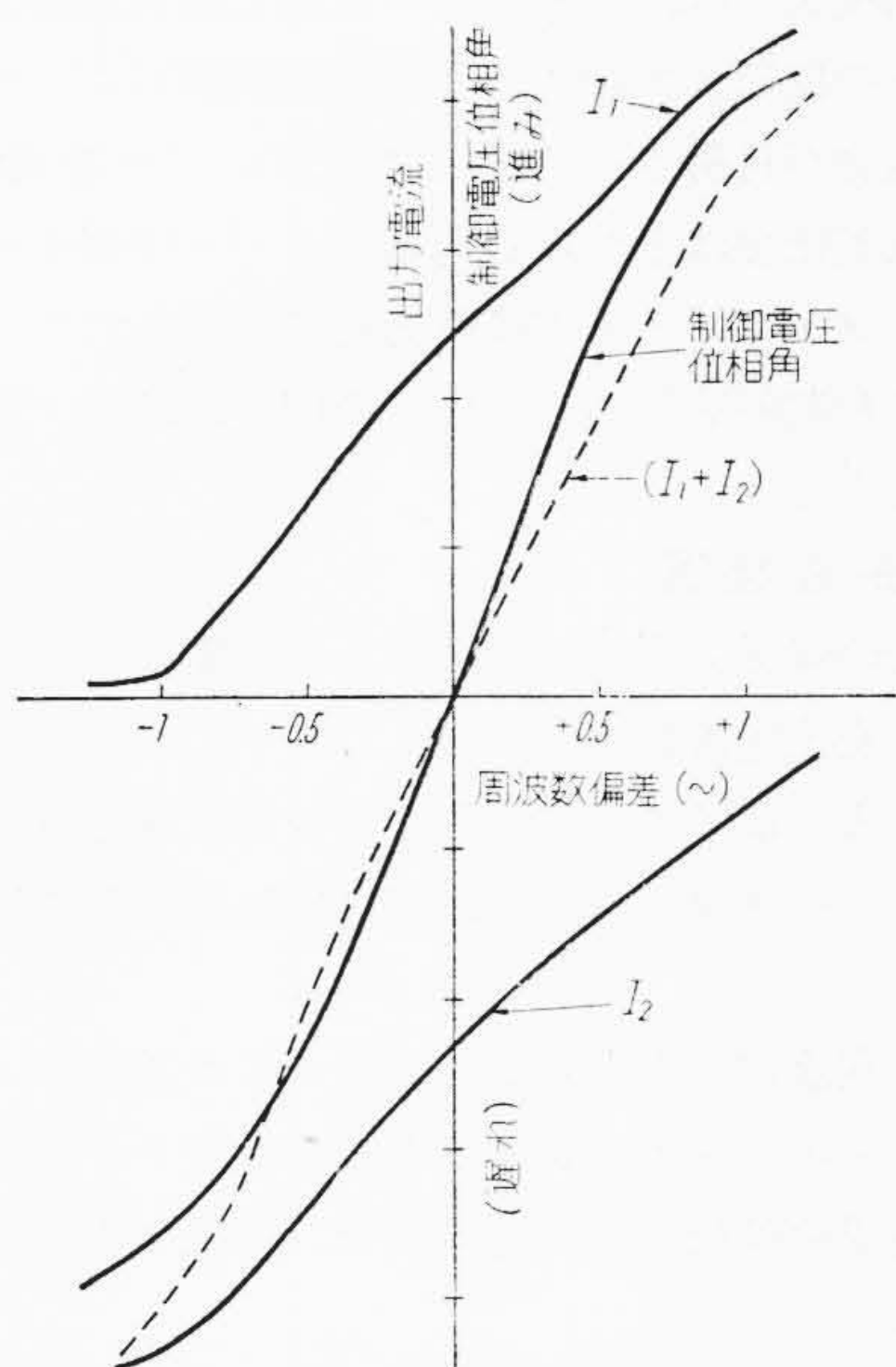
#### 4.1 周波数偏差検出装置

LC 並列共振回路に直列に変圧器 ( $T_c$ ) が接続されている。その二次側に誘起される電圧の位相は周波数が共振周波数より低いときには電源電圧に対して遅れ位相となり、逆に共振周波数より高いときには進み位相となる。すなわち周波数の偏差を変圧器 ( $T_c$ ) の二次電圧の位相の進み、遅れとして検出する。

#### 4.2 速応性磁気増幅器

日立電気式調速機の特長は電氣的





第5図 周波数，制御電圧位相角および速応性磁気増幅器出力電流特性

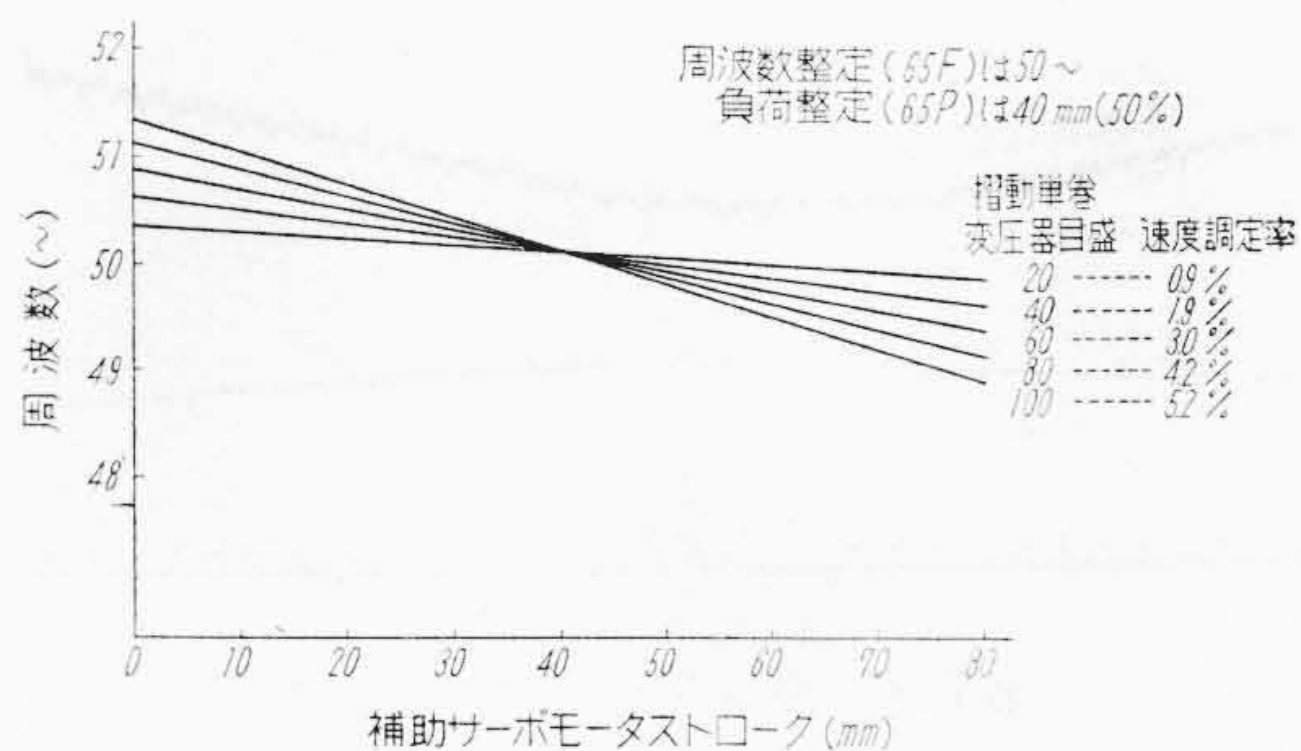
な増幅部分に独得の位相弁別速応性磁気増幅器を使用していることである。すなわち従来の磁気増幅器，速応性磁気増幅器が制御量として電圧あるいは電流を用いているのに対して日立電気式調速機の速応性磁気増幅器では電源電圧に対する制御電圧の位相差を用いている。この位相弁別速応性磁気増幅器の動作原理はすでに説明されており<sup>(1)</sup>ここでは省略する。周波数，制御電圧位相角および出力電流の関係を第5図に示す。速応性磁気増幅器(MA<sub>1</sub>)の出力電流を  $I_1$ ，(MA<sub>2</sub>)の出力電流を  $I_2$  とすればこれがプッシュプル接続された場合の実際の出力は  $(I_1+I_2)$  で表わされる。すなわち実際の出力は周波数偏差にほぼ比例している。

#### 4.3 周波数整定装置

運転周波数を 50 $\sim$ あるいは 60 $\sim$ 前後の任意の値に整定し，また並列時の揃速のために本装置を備えている。周波数整定用加減抵抗器(65F)は抵抗器(R<sub>F1</sub>), (R<sub>F2</sub>)のブリッジ接続となっており速応性磁気増幅器の制御巻線に電源電圧と同位相あるいは反対位相の電圧を加え，検出回路からの磁束リセット電圧と合成されて調速機の運転周波数を整定する。また加減抵抗器(65F)はこれによって自動揃速をも行うため直流電動機駆動とし，タップ刻みもきわめて細かくしてあるから実用上連続的に滑らかな整定値変更ができる。周波数整定範囲は+2 $\sim$ -4 $\sim$ を標準としている。

#### 4.4 速度調定率および出力整定装置

機械式調速機の剛性復原機構に相当する部分で，水車発電機速度調定率および整定周波数における出力すな



第6図 速度調定率特性

わち案内羽根開度あるいはニードル開度を整定する装置である。出力整定用加減抵抗器(65P)と補助サーボモータに直結された中間タップ付可変リアクトル(L<sub>P</sub>)とのブリッジ回路，および可変電圧単巻変圧器(Sd, PC)からなり補助サーボモータのストロークに応じて変化する出力電圧を速応性磁気増幅器の制御巻線に加えて，前述の周波数整定装置のそれと同じく検出回路からの磁束リセット電圧と合成されて周波数整定点を変え，速度調定率特性をうる。また逆に加減抵抗器(65P)の可動子を移動することによって補助サーボ・モータの平衡位置を移動させ整定周波数における出力を任意に整定することができる。速度調定率の大きさは可変電圧単巻変圧器(Sd, PC)によってブリッジ回路の電源電圧を変えて0 $\sim$ 5%の間で任意の値に整定することができる。周波数整定 50 $\sim$ ，出力整定 50%における速度調定率特性を第6図に示す。

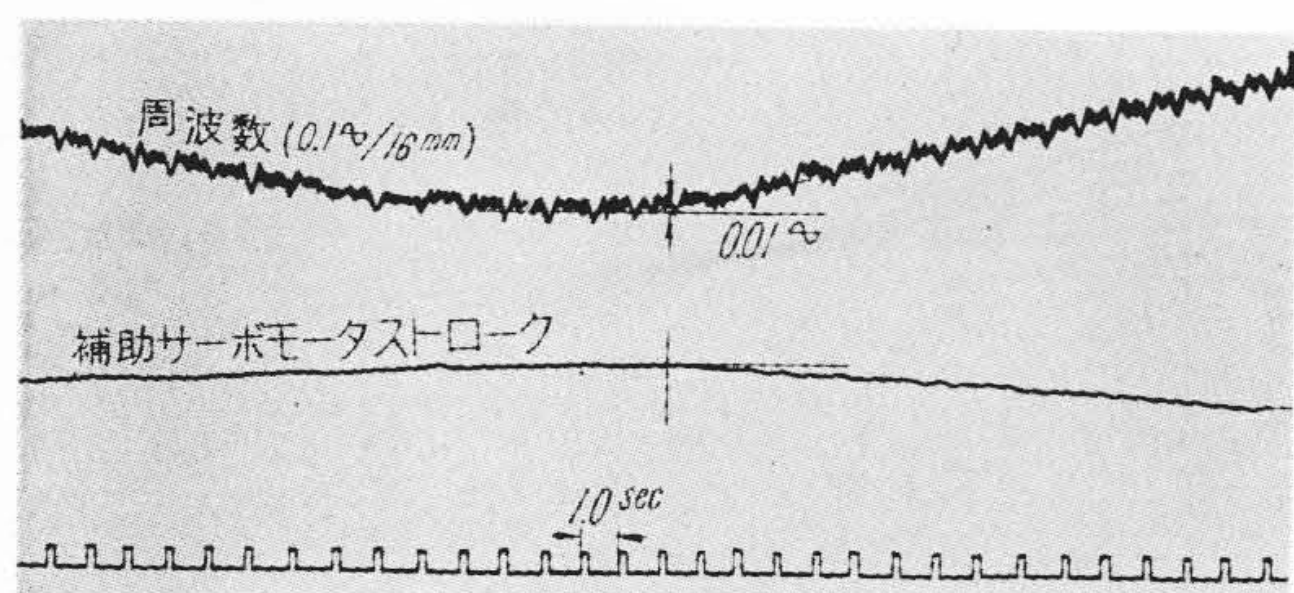
#### 4.5 ダンピング整定装置

補助サーボモータのストロークを微分して速応性磁気増幅器に饋還し制御系の安定化および応答度を調整する装置である。補助サーボモータに直結された可変リアクトル(L<sub>D1</sub>)によって変圧器(T<sub>D</sub>)の二次電圧が変化することを利用し，これを全波整流，平滑化した後，容量(C<sub>D1</sub>)と抵抗(R<sub>D1,3</sub>)によって微分して速応性磁気増幅器に饋還している。ダンピング整定装置の特性を規定するものとして，補助サーボモータストロークが階段状に変化したときの微分饋還量の大きさおよび減衰の時定数があるが，饋還量の大きさは抵抗によって分圧して0 $\sim$ 50%の間を適宜選択し，時定数は容量を増減して0 $\sim$ 10秒の間を適宜選択する方式をとっている。

#### 4.6 アクチュエータ・ソレノイド

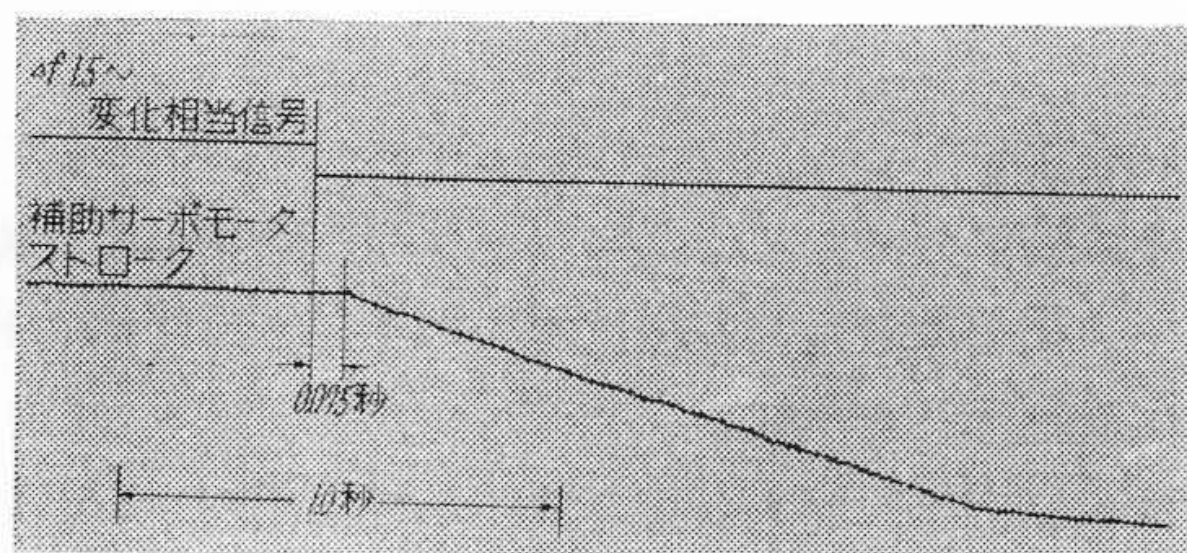
アクチュエータ・ソレノイドは速応性磁気増幅器の出力電流の変化を機械的操作力に変換するものである。動作原理は上方にある励磁コイルによって空隙に強い磁場ができ，この空隙に挿入された二つのコイルに速応性磁気増幅器の出力電流を差動的に流すので，出力電流に差があるとこのソレノイドは力を受けてバネを上または下





(北海道電力芦別発電所)

第7図 感度測定オシログラフ



(北海道電力芦別発電所)

第8図 不動時間測定オシログラフ

に圧縮して変位する。

#### 4.7 一次配圧弁および補助サーボ・モータ

一次配圧弁はアクチュエータ・ソレノイドに直結されてアクチュエータ・ソレノイドのわずかな変位に対しても速応できる構造となっており、パイロットバルブの上下動により圧油を切換え、補助サーボモータを開閉させる。

補助サーボモータの動きはレバーを介して二次配圧弁を操作して主サーボモータを動かすがこの機構は従来の機械式調速機と同じである。

周波数をゆるやかに変化し反転させたときの補助サーボモータの動きをオシログラフに撮り不動帯を求めてその $1/2$ を感度とするが平均 0.013% 程度でいずれも保証感度 0.02% を十分満足している。感度測定オシログラフの一例を第7図に示す。

また並列共振回路の容量を変えて周波数偏差を急激にあたえたときの補助サーボモータの動きから不動時間を求めると 0.04~0.08秒程度である。不動時間測定オシログラフの一例を第8図に示す。

#### 4.8 配圧弁鎖錠および手動開度調整装置

配圧弁鎖錠装置は案内羽根開度を任意にその開度に鎖錠する装置で配圧弁鎖錠操作すれば鎖錠用電磁弁が付勢されて鎖錠用バルブは上部からの圧油によって下動し、一次配圧弁は配圧弁鎖錠レバーによって中性位置に押えられる。一方アクチュエータ・ソレノイドは開方向に付勢されているから一次配圧弁は開閉方向ともに鎖錠されて中性位置を保ち案内羽根はその位置に固定される。もし中性位置がはずれても配圧弁鎖錠レバー、カムはクラッチによって補助サーボモータに連動されているので一次配圧弁を中性位置にもどす。

手動開度調整は配圧弁鎖錠の状態では負荷制限装置を配圧弁鎖錠の位置まで閉めると制限開閉器によって鎖錠除外用電磁弁が付勢されて配圧弁鎖錠レバーを除外するが、一次配圧弁は上から負荷制限レバーで押えられアクチュエータ・ソレノイドは開方向に付勢されているので以後は負荷制限装置により任意の開度に調整、保持することができる。

#### 4.9 保護装置

調速機の保護装置として次のものを備えている。

##### (1) 交流電源異常

装置の入力端子に過電圧および低電圧継電器を接続しアクチュエータ発電機故障、定電圧装置故障に備えている。

##### (2) 直流電源喪失および励磁コイル断線

アクチュエータ・ソレノイドの励磁コイル回路には低電流継電器を接続し直流電源喪失、励磁コイル断線に備えている。

##### (3) 過速度防止

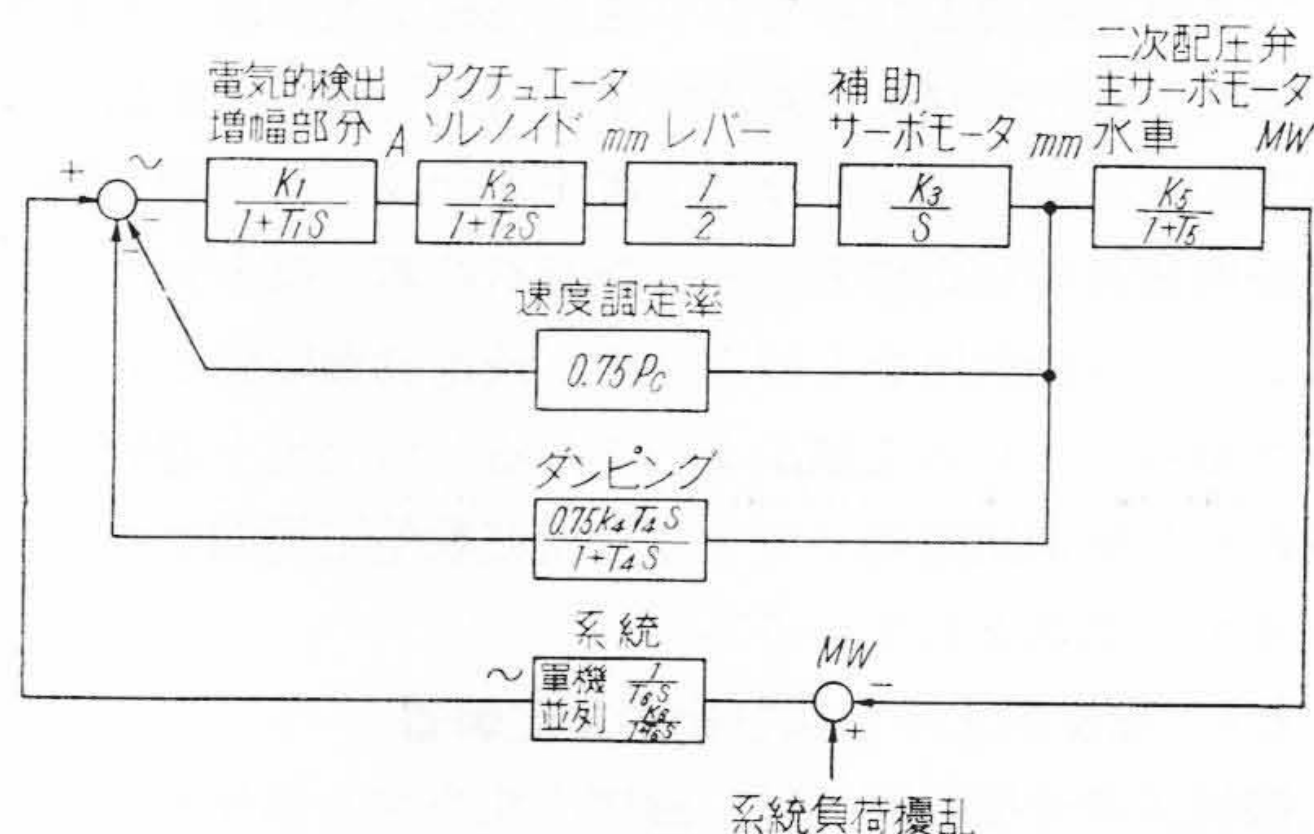
装置入力端子に周波数継電器を接続し配圧弁鎖錠あるいは手動開度調整時負荷を急激に失って速度が異常に上昇するときには配圧弁鎖錠、手動開度調整装置を除外して調速機運転に復帰させる。

#### 4.10 ボード線図

調速機、水車発電機および系統を含めた全制御系のブロック線図を第9図に示す。また補助サーボモータおよび主サーボモータまでのボード線図を第10図に示す。ダンピングを強めると利得は $\omega$ のより小さいところで低下するからダンピングを調整することによって調速機の応答を調整することができる。

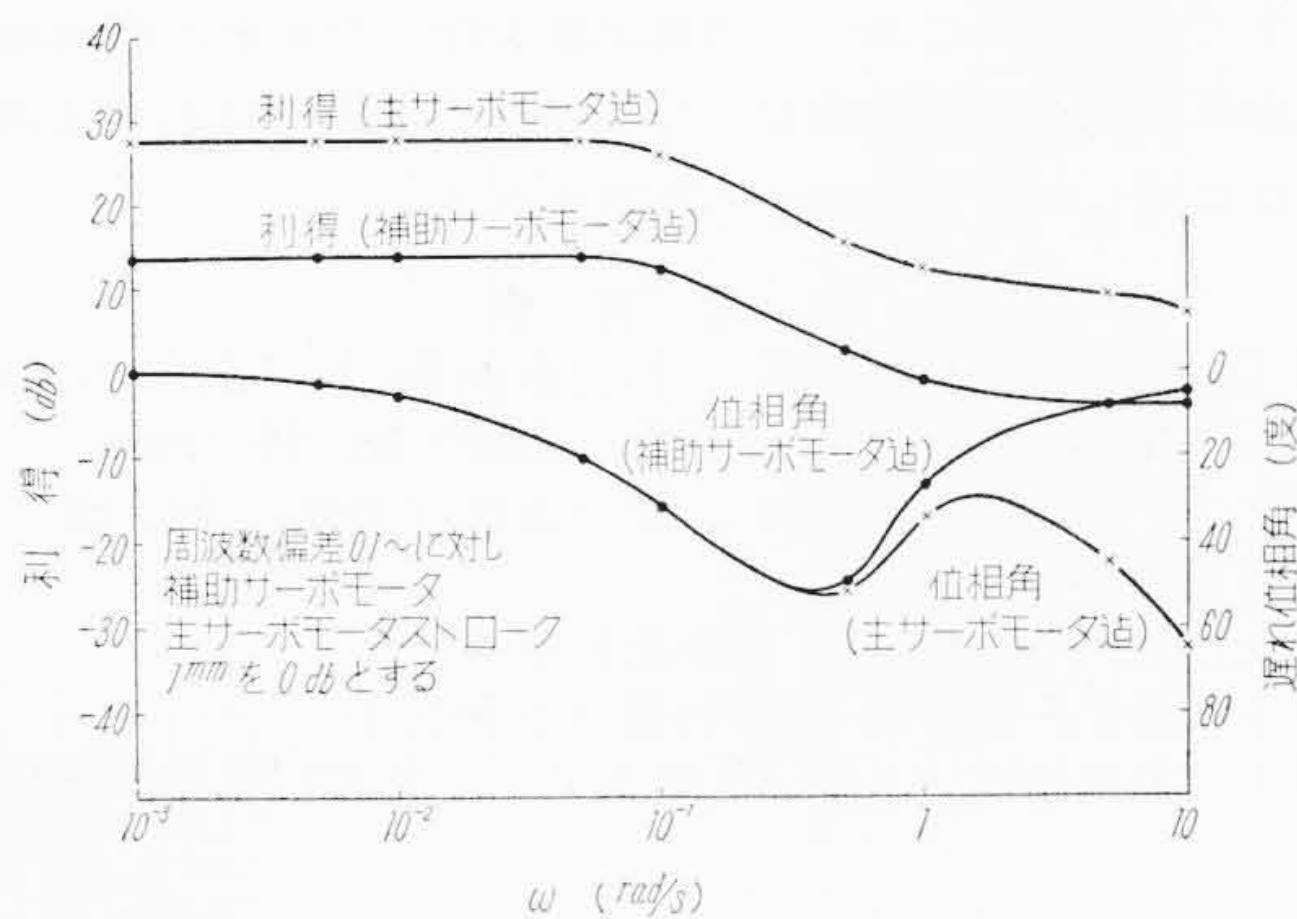
### 5. 現地試験結果

現地試験の一例として北海道電力芦別発電所および上川発電所の実績を記載する。第11図に全負荷遮断時のオシログラフを示す。速応性を示す補助サーボ・モータの不動時間は 0.04 秒で従来の機械式調速機に対して非常に小さい。そのほかの諸数値は主に水圧上昇の抑制、



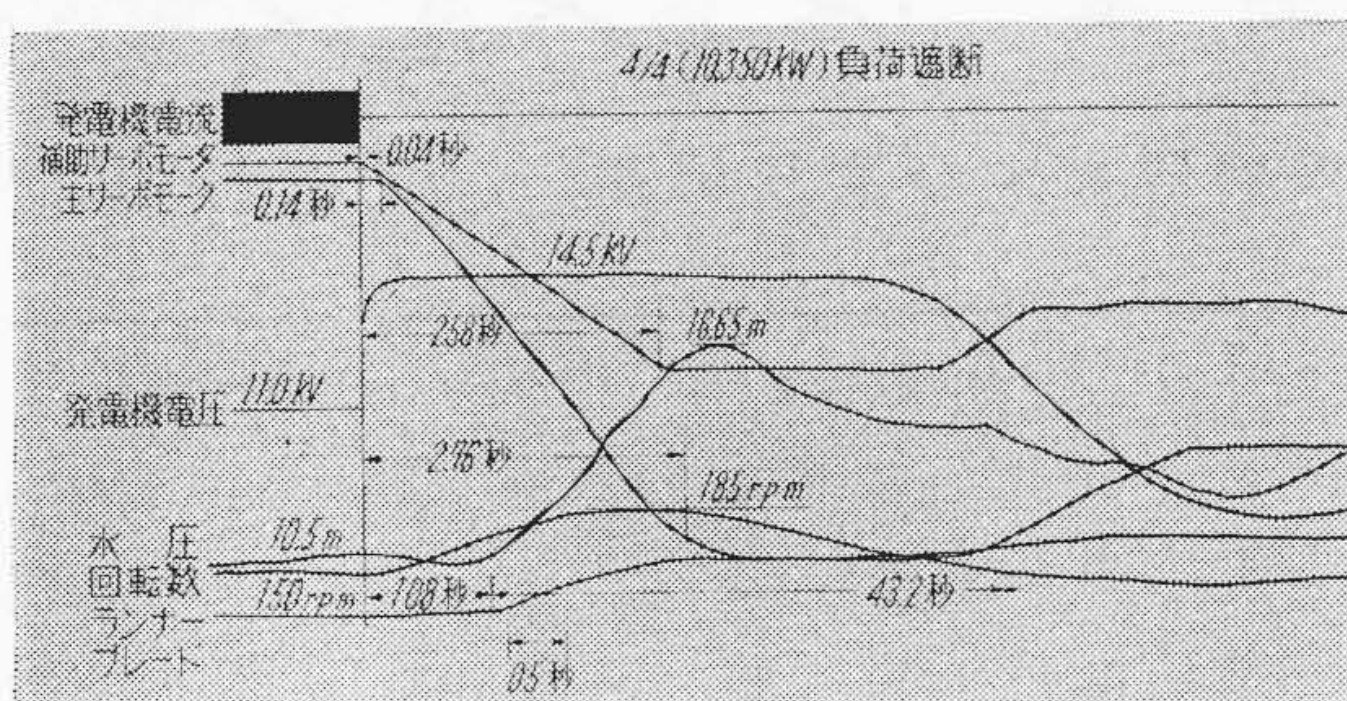
第9図 ブロック線図





速度調定率 3%      ダンピング 強さ 5%  
時定数 1秒

第10図 ボード線図



第11図 北海道電力芦別発電所全負荷遮断試験オシロ

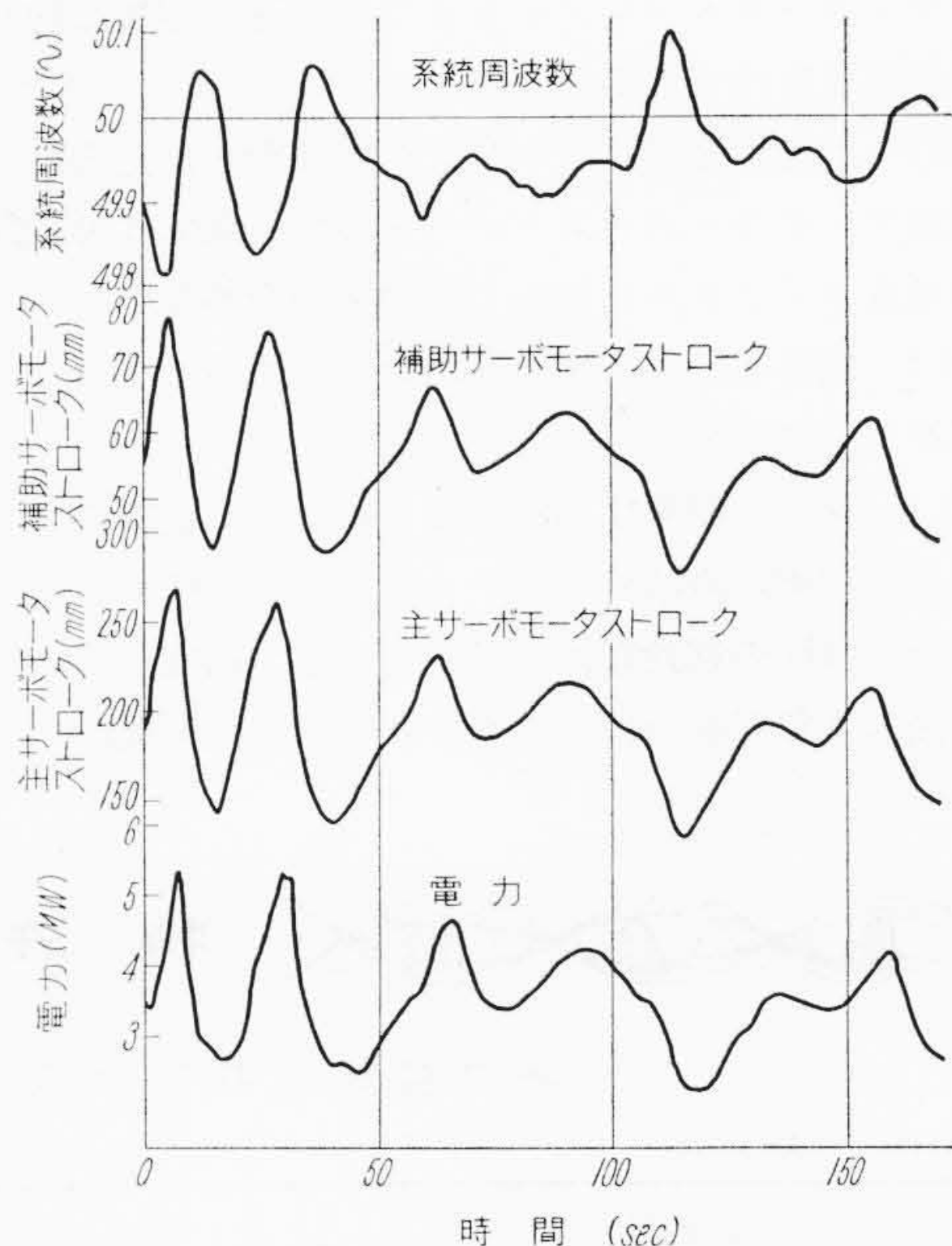
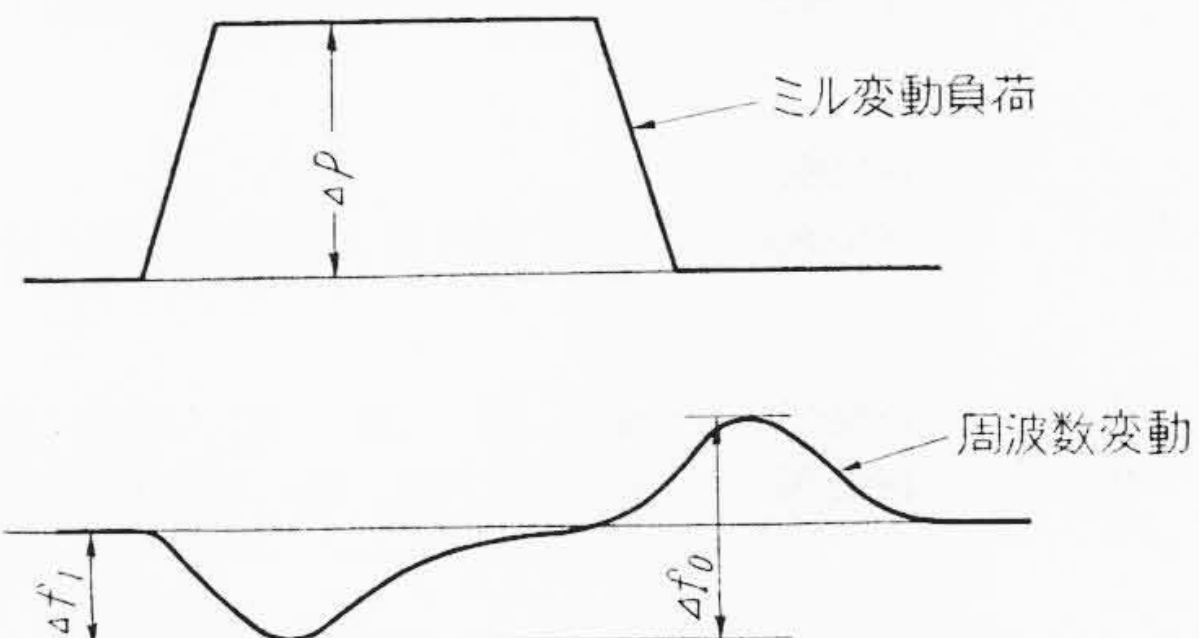
水車発電機固有の特性に制限されるので機械式調速機の場合とほとんど同じである。

## (2) 周波数応答試験

第12図は電気式調速機運転中の各部の動作オシログラフであり、 $\pm 0.1\sim 10\sim 15$ 秒の周期の周波数変動に対して主サーボ・モータまで応動していることがわかる。

第2表はさらに富士製鉄(室蘭)のホット・ストリップミル稼動時に芦別発電所の電気式調速機がいかなる応答を示すか、負荷制限運転中の場合と比較したものである。

富士製鉄(室蘭)のホット・ストリップミルの負荷は最大負荷 17,000~23,000 kW, 持続時間 30 秒程度のほぼ矩形状をなす急峻変動負荷であるがこの負荷の吸収のために虹田発電所に追従制御装置、雨竜発電所に AFC 装置を設けているが、さらにこのバック・アップとして芦別発電所 (10,600 kW×1), 上川発電所 (6,500 kW×2), 岩松発電所 (7,500 kW×2) の計 5 台の水車発電機に日立電気式調速機を設置して特にこの変動負荷の立ち上り部分の吸収に役立たせようとした。第2表にて明らかなごとく芦別発電所のみで周波数変動幅を 10~20% 減少させて、AFC を備えた雨竜発電所の負担を大幅に軽減させている。その後上川岩松両発電所が運転に入りさらに顕著な効果をあげている。

第12図 北海道電力上川発電所系統周波数応答試験  
ガバナフリー、PC 1%, DP 3-1第2表 富士製鉄(室蘭)のホットストリップミル  
負荷による周波数変動

| 試番 | 富士製鉄ミル変動負荷 (JP) | 周波数変動 $\Delta f_1$ ( $\Delta f_0$ )      | 芦別発電所変動出力     | 雨竜発電所 AFC 変動出力 | 備考                     |
|----|-----------------|------------------------------------------|---------------|----------------|------------------------|
| 1  | (kW)<br>17,500  | ( $\infty$ ) ( $\infty$ )<br>-0.13(0.25) | (kW)<br>2,200 | (kW)<br>6,000  | 芦別発電所<br>電気式調速機<br>運転中 |
| 2  | 22,500          | -0.16(0.28)                              | 4,100         | 10,000         |                        |
| 3  | 17,500          | -0.17(0.30)                              | —             | 9,000          | 同上<br>負荷制限<br>運転中      |
| 4  | 22,500          | -0.20(0.32)                              | —             | 12,000         |                        |

## 6. 結 言

以上、日立電気式調速機の数値制御方式、各部の動作原理と特性および現地試験結果の概要を報告したが、標準形の日立電気式調速機の特長を要約すると次のとおりである。

- (1) 感度が高く平均 0.013% 程度で保証感度 0.02% を十分に満足しているが従来の機械式調速機に比べて格段とよい結果を示している。
- (2)  $1/2\sim$  応答の速応性磁気増幅器を使用しておりア



クチュエータ・ソレノイドまでの応答時定数は約0.05秒の高速応性である。

(3) 速度調定率, ダンピング特性をあたえるための補助サーボモータ・ストロークの発信部には可動鉄心の可変リアクトルを使用し摺動部が全然ない。

(4) 増幅部に速応性磁気増幅器を使用しており消耗部がなく寿命も長い。

(5) 速応性磁気増幅器をはじめ全制御装置の電源を水車発電機に直結のアクチュエータ発電機から供給するためほかの補助電源を必要とせず信頼性が高い。

最後に本稿記載のほかにも日立電気式調速機について

数多くの発電所において現地試験を行ったがその際終始熱心に御指導, 御援助をいただいた各電力会社の当事者各位に対して深く感謝する次第である。

#### 参考文献

- (1) 小林, 近野, 紛沢: 日立評論 38, 10, 1,225(1956)
- (2) 紛沢, 山口: 日立評論 (別冊) 26, 56 (1958)
- (3) 小林, 平井, 小松: 日立評論 (別冊) 26, 49 (1958)
- (4) 電気学会編: 自動周波数制御
- (5) 実吉, 横田: 自動制御 1.5 No. 1
- (6) オーム社: OHM(電気ガバナ特集) No.3(1957)

## 特許と新案

### 最近登録された日立製作所の特許および実用新案

(その4)

(36頁より続く)

| 区 別  | 登録番号   | 名 称                  | 工 場 別     | 氏 名          | 登録年月日     |
|------|--------|----------------------|-----------|--------------|-----------|
| 実用新案 | 486996 | 潜水電動機器               | 亀戸工場      | 橋本 勲 一       | 34. 1. 14 |
| "    | 487002 | 巻鉄心型変成器              | 亀戸工場      | 井上 藤 徳 平     | "         |
| "    | 487006 | 押上機付制動機              | 亀戸工場      | 武松 田 幸 治 郎   | "         |
| "    | 486909 | 組立箱の漏洩防止装置           | 栃木工場      | 鈴木 藤 清       | 34. 1. 14 |
| "    | 486993 | 熱交換器                 | 栃木工場      | 須野 松 林 功     | 34. 1. 19 |
| "    | 486880 | 多数共同加入電話回線における割込防止装置 | 戸塚工場      | 松田 島 喜 平 太 郎 | 34. 1. 14 |
| "    | 486923 | 磁器筒絶縁型蓄電器            | 戸塚工場      | 江大 市 川 清 司   | "         |
| "    | 486925 | 速作動速復旧継電器装置          | 戸塚工場      | 田島 森 喜 平 太 郎 | 34. 1. 14 |
| "    | 486989 | テレビジョンカメラの雲台         | 戸塚工場      | 江中 熊 谷 千 尋   | 34. 1. 19 |
| "    | 486992 | 手動交換機正面パネルの機器取付装置    | 戸塚工場      | 熊津 林 正 清 一   | "         |
| "    | 487000 | ランジバン型電気機械変換子        | 戸塚工場      | 川上 正 光       | "         |
| "    | 487003 | ロータリースイッチの切換カム       | 戸塚工場      | 高橋 一 博       | 34. 1. 19 |
| "    | 486910 | 超小型電子管類の包装用内容器       | トランジスタ研究所 | 大倉 勉         | 34. 1. 14 |
| 実用新案 | 486887 | 熱交換器                 | 日立研究所     | 小堀 与 一       | 34. 1. 14 |