

磁気増幅器式PID制御器

Magnetic Amplifier Type PID Controller

奈良 明 直*
Akinao Nara

内 容 梗 概

電子管やトランジスタを用いたPID制御器は市場に数多く見られるが、磁気増幅器を素子としたものは欧米でもいまだ数少ない。

本稿では磁気演算増幅器 (MAGOPEAMP) を基本素子として組み込んだ純アナログ式高信頼性、長寿命のPID制御器について述べた。回路的にも制限積分動作、拡大微分動作などの特長がある。

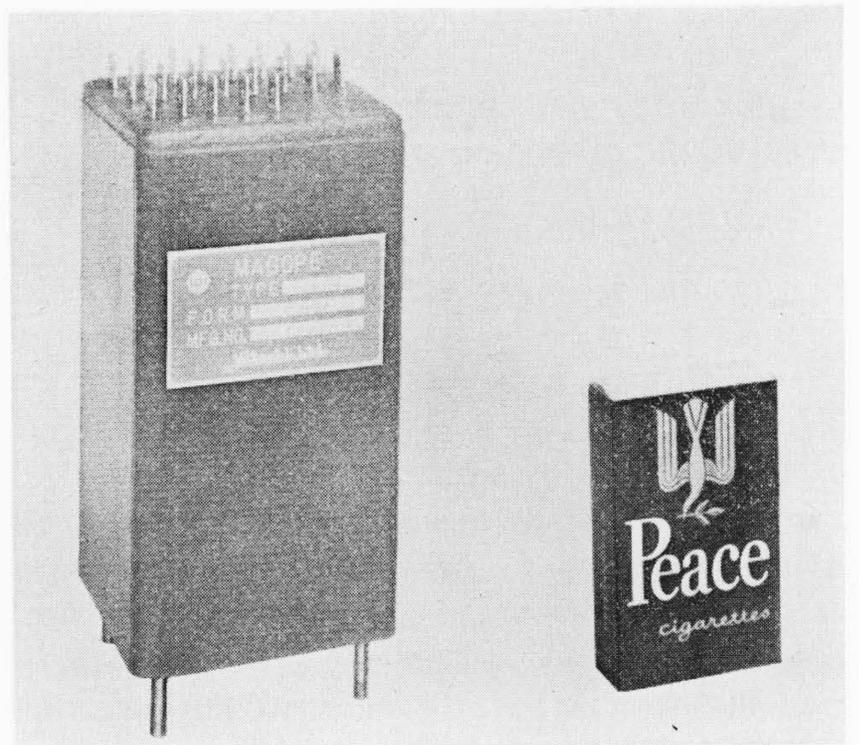
1. 緒 言

PID制御器は、自動制御系の定値制御、追従制御およびプログラム制御に必要とされる基本的な制御器で、従来は電子管増幅器を用いて構成されたが、最近ではトランジスタ式のものも市場に見られる。しかし巨大なプラントで制御機器の故障がその都度重大な被害を生じるような場合、電子管の性能変化と短寿命、トランジスタの電氣的弱さを考えると、それらの使用は必ずしも適切なものとはいえない。われわれはこのような制御システムに用いられる器具として、従来より磁気増幅器を、その変圧器と同程度の電氣的機械的堅固さ、寿命の長さのゆえに用いてきたが、PID制御器も同様に磁気増幅器で構成するよう試みてきた。しかし数年前までは磁気増幅器の鉄心材料、半導体整流器の性能などの条件から、とうてい電子管並の精度をもつものは製作不可能であった。しかし高透磁率をもったモリブデンパーマロイ巻鉄心の出現、高い逆方向抵抗値を示すシリコンダイオードの実用化が本格化するに及んで、当社中央研究所と協力して磁気演算増幅器 (MAGOPEAMP) の開発に成功した。磁気演算増幅器は鉄心の高透磁率と特殊な巻線仕様により、微小入力 (μA クラス) で動作する高利得増幅器であるから、工業用アナログ演算器として種々用いられるほか、その応用製品として高精度のPID制御器を製作し得る見通しを得たものである。このようなPID制御器はそのほかの磁気増幅器を用いた機器と組み合わせて用いた場合、信頼度の点でバランスをとることができる。汎用の電子式PID制御器に比べやや高価であるが、アナログ演算器として回路は比較的簡単であり安価であるから、工業用純アナログ制御器としては画期的製品であるといえる。この制御器はまず京都大学原子炉シミュレータ用としての納入実績をもち、次いで住友電気工業株式会社大阪製作所に、また日本原子力研究所の原子炉 JRR 制御用として納入が予定されている。

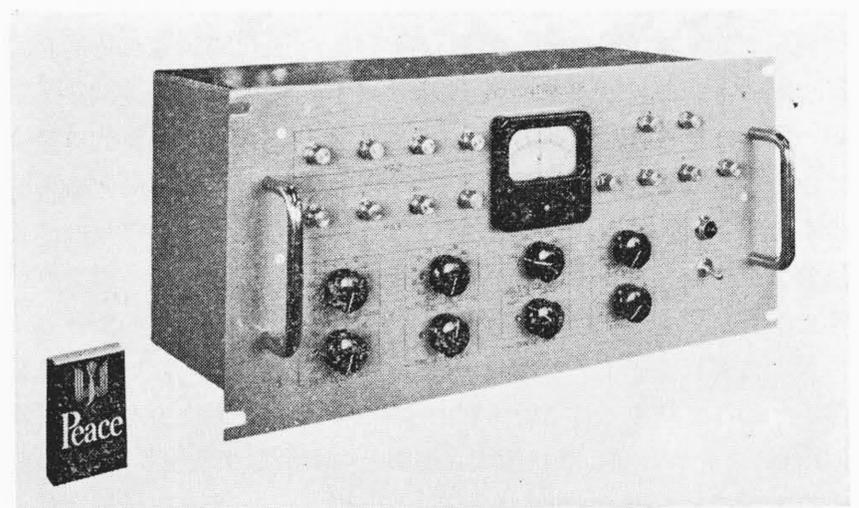
特長を下記列挙する。

- (a) 電子管のようにヒータがないので電源を入れてすぐ動作し、電力消費も小さいのでほとんど発熱しない。
- (b) 内部はすべて固体素子で構成されておりじょうぶであるとともに寿命は半永久的である。
- (c) 磁気演算増幅器が出力と絶縁された入力巻線を持つ直流増幅器であるため、演算回路構成は簡単となり、形態も比較的小である。
- (d) トランジスタのような温度による大幅な特性変化がなく動作はきわめて安定である。
- (e) アナログ演算回路を厳密に適用しているためPID演算はきわめて正確で、伝達関数中にいわゆる相互干渉係数は含まれない。

* 日立製作所日立工場



第1図 樹脂モールドされた磁気増幅器式演算器リアクトル

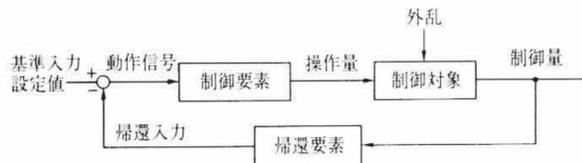


第2図 磁気増幅器式PID制御器

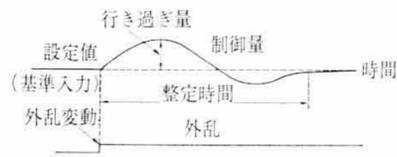
- (f) “制限積分動作”および“拡大微分動作”を行なっているため、比較的小容量のコンデンサで長い微積分時間を実現でき、吸収現象の大きい大容量電解コンデンサを用いなくてすむので微積分特性は良好である。
- (g) “制限積分動作”は積分出力の極値を制限するもので従来のPID動作の場合より制御の即応性と安全性と精度とを向上させるものである。

2. 動作原理

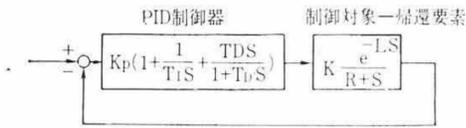
- (a) 自動制御系における位置
PID制御器一般としての自動制御系における位置は第3図のプロ



第 3 図 自動制御系ブロック線図



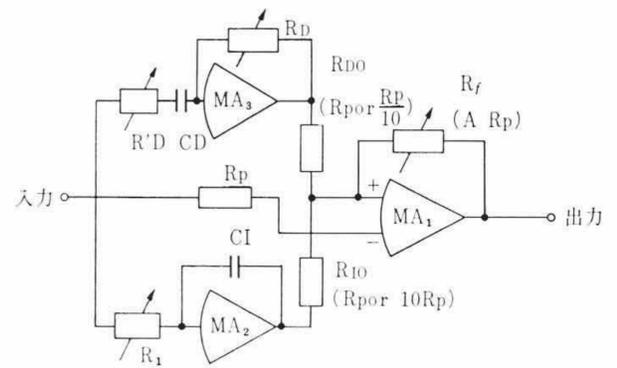
第 5 図 制御量の外乱変動に対する応答



第 4 図 PID 制御系の各部伝達関数



第 6 図 制御量の設定値変更に対する応答



第 7 図 磁気増幅器式 PID 制御器演算基本回路

第 1 表 最適 PID 定数

PID 定数	K_P	T_I	T_D
最適値	1.2/KL	2L	0.5L

ック線図における“制御要素”に相当する。

(b) 伝達関数

$$G(S) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I S} + \frac{T_D S}{1 + T_D' S} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 K_P : 比例感度 (100/比例帯%)
 T_I : 積分時間 (秒)
 T_D : 微分時間 (秒)
 T_D' : 微分遅れ時間 (秒)
 S : ラプラス演算子

第 3 図において (操作量)/(動作信号) のラプラス変換が PID 制御器の伝達関数となる。(1) 式右辺括弧内の第 1 項は比例動作項 (P)、第 2 項は積分動作項 (I)、第 3 項は微分動作項 (D) であり、並列加算する形となるゆえ 3 項動作ともいわれる。P 動作は第 1 項のみ、PI 動作は第 1 項と第 2 項のみであるから PID 動作よりも制御性が劣る。

(c) PID 定数の決定

(1) 式の K_P , T_I , T_D' , T_D を設定する基準として制御対象の伝達関数が既知で第 4 図のような形をもつかまたは近似される場合は Ziegler-Nichols の公式にしたがった第 1 表を用い、伝達関数が未知の場合は第 5, 6 図における整定時間と行き過ぎ量が協調的に最小になるように設定する。 T_D' は $T_D' = \frac{1}{10} T_D \sim \frac{1}{5} T_D$ にとるのが最もよい。実際には PID 制御器はじめ制御系各部はそれぞれの飽和値および感度を有しているから、すべての部分が協調的に最大の精度をもちしかも飽和しないよう第 4 図における K_P , K の配分および K に含まれるゲインの配分が行なわれなければならない。PID 動作が P 動作よりすぐれている理由は積分動作が P 動作の有する定常偏差 (制御量が安定した状態で設定値との間に有する偏差) を打ち消すことができる——すなわち制御精度がよい——また微分動作が行き過ぎ量を減ずることができ、したがって K_P を増すことも整定時間を減ずることもできるからである。

(d) 制限積分動作と拡大微分動作

第 7 図において積分器 (MA2) から加算器 (MA1) にはいる抵抗 R_{I0} および微分器 (MA3) から加算器にはいる抵抗 R_{D0} が同一であれば (1) 式の伝達関数において

$$\left. \begin{aligned} K_P &= \frac{R_f}{R_P} = \frac{A R_P}{R_P} = A \\ T_I &= C_I R_I \\ T_D &= C_D R_D \\ T_D' &= C_D R_D' \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

となり R_f , R_I , R_D , R_D' によって PID 定数を設定できる。次に R_{I0} を $10 R_P$, R_{D0} を $R_P/10$ にしたとすると (1) 式の伝達関数において

K_P と T_D' は (2) 式の値と同一であるが、 T_I と T_D は

$$\left. \begin{aligned} T_I &= 10 C_I R_I \\ T_D &= 10 C_D R_D \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

となる。ただし T_D' については $R_{D'}$ を 10 倍にすることにより T_D/T_D' を一定に保つことができる。このように積分器出力を制限し、微分器出力を拡大することによって C_I , C_D の容量は増さずに微積分時間を増加させることができるが、制限積分動作にはさらに下記の利点がある。

前述のように積分動作は定常偏差を打ち消すためにあるが、制御の行き過ぎ量および整定時間に対してはそれを増加させる働きがある。したがって積分出力の大きさは定常偏差を打ち消せる範囲なるべく制限したほうが望ましく、その点制限積分動作は要求にマッチしており、さらに入力の精度も高い。

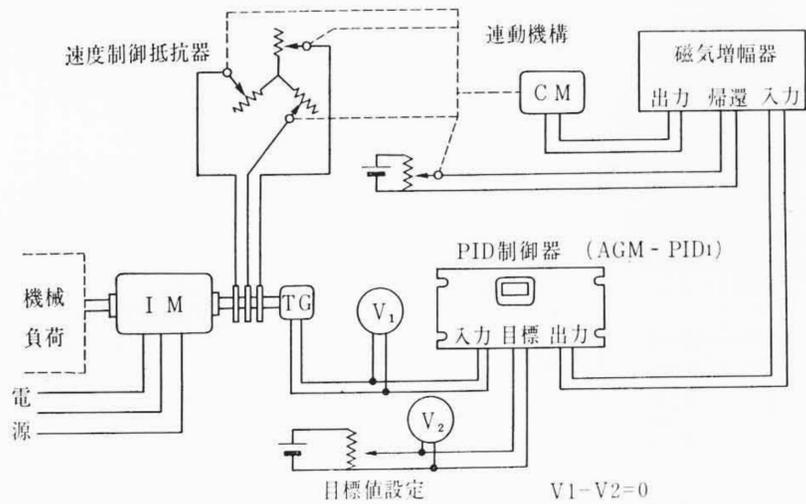
(e) 磁気演算増幅器の負極性入力端子

磁気演算増幅器は第 7 図の MA1 に示すように (-) 入力端子を持つことができ、電子式に比べ符号変換器を一つ減ずることができる。

3. 標準仕様

(a) 電圧入出力形 (形式 AGM-PID 1)

- ケース寸法 221.5×482×200 (RETMA 標準パネル規格)
- 比例帯 K_P 5~200% 連続設定
- 積分時間 T_I 6~1,800 秒 22 段設定
- 微分時間 T_D 1.8~600 秒 24 段設定
- 微分遅れ時間 T_D' 0.18~60 秒 24 段設定
- 入力仕様 比較器はないから、内部インピーダンス 1kΩ 以下、±20V 以下の動作信号入力であること。
- 出力仕様 (演算精度) -10~+10 ボルトで比例帯 100% における比例出力の非直線性は 0.3% 以下、-15, +15 ボルトで飽和、接続負荷抵抗は 3kΩ 以上のこと。
- 零ドリフト 比例帯 100% において積分器出力を除き 12 mV/4 h 以内。
- 出力指示メーター -15~+15 ボルト、切換スイッチにより各部電圧チェックおよび調整に利用できる。
- 手動制御 切換スイッチによって制御ループを開き -10~+10 ボルトの可変出力で手動制御可能。
- オフライン切換 PID 制御器を制御ループからははずし閉ループとする切換可能。
- 電源 100/110 ボルト 50/60 サイクル 6 VA
- (b) 電流入出力形 (形式 AGM-PID 2)
- 入力仕様 4~20 mA (日立標準電送信号)。比較器を内蔵するので帰還信号入力であること。内部抵抗 250Ω。



第8図 誘導電動機の2次抵抗によるPID速度制御

出力仕様 (演算精度) 4~20 mA (日立標準伝送信号) で比例帯100% における比例出力の非直線性は1.0 以下, 30 mA で飽和, 接続負荷抵抗は500Ω 以下の こと。

そのほか電圧形に準ずる。

4. 応 用 例

(a) 誘導電動機速度制御 (サーボ制御の一例)

第8図で電圧計 V_1 は誘導電動機 (IM) の速度を, 電圧計 V_2 は目標とすべき速度を指示し最終的に $V_1 - V_2 = 0$ となるよう制御する。

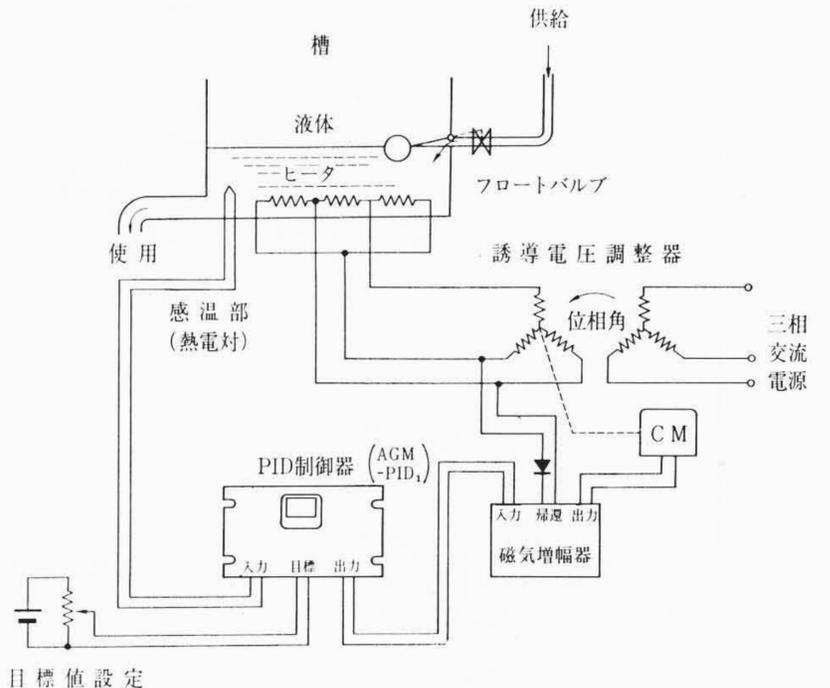
P動作では0にならずに目標値に対する誤差を生ずる。またP動作に比較し磁気増幅器のゲインを上げててもハンチング (振動) を起こさず制御の即応性を増すことができる。

(b) 温度制御 (プロセス制御の一例)

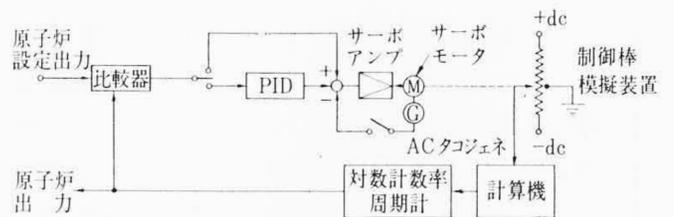
温度, 圧力, 流量, PH などのいわゆるプロセス量の制御は系の応答遅れが大であるため特にPID制御が有効である。第9図に示す温度制御では槽の液体を熱するヒータの電源に誘導電圧調整器をおき, この設定をPID制御するものである。液体の使用量および自然放熱が系の外乱となるが, 外乱量のいかにかわらず温度を目標値に急速に完全に一致させることのできるのがPID制御器の特長である。

(c) 原子炉シミュレータ制御

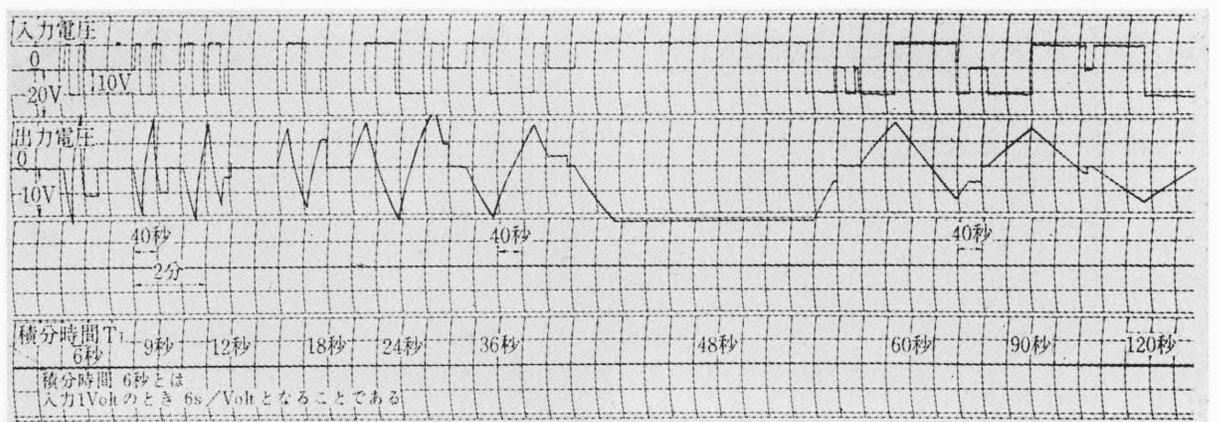
第10図のブロック線図で示すように原子炉がアナログ計算機でシミュレートされ, 対数計数率周期計出力が原子炉出力として比較器における設定出力と比較される。切換スイッチは制御ループからPIDがはずされたときの考慮であり, AC速度発電機の回路は制御棒模擬装置の可変抵抗器の位置をPID出力に比例させるためのサーボアンプの帰還回路である。これは原子炉を模擬したアナログ計算機において原子炉定数および設定圧力を変えた場合制御器のとるべき最適の伝達関数をPIDによって探索し, 原子炉の動特性を最適とするためのものである。



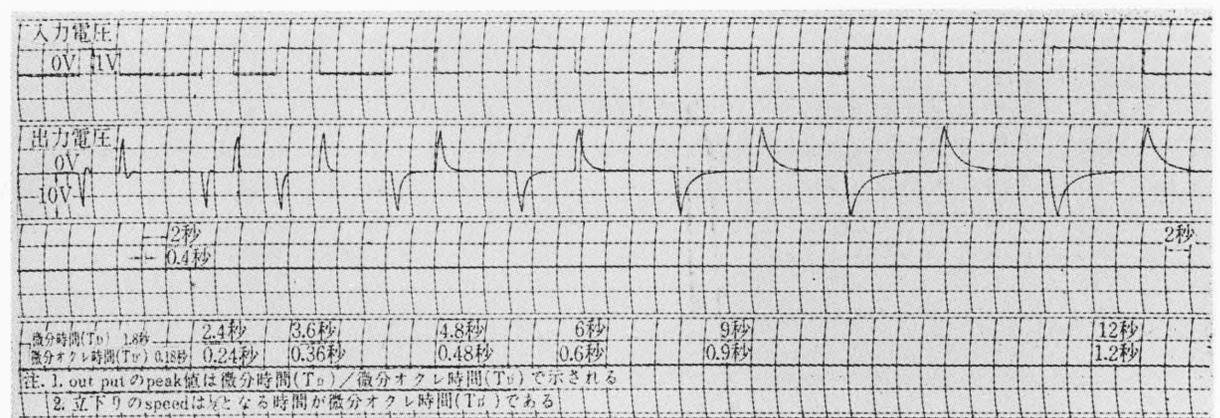
第9図 槽液の誘導電圧調整器によるPID温度制御



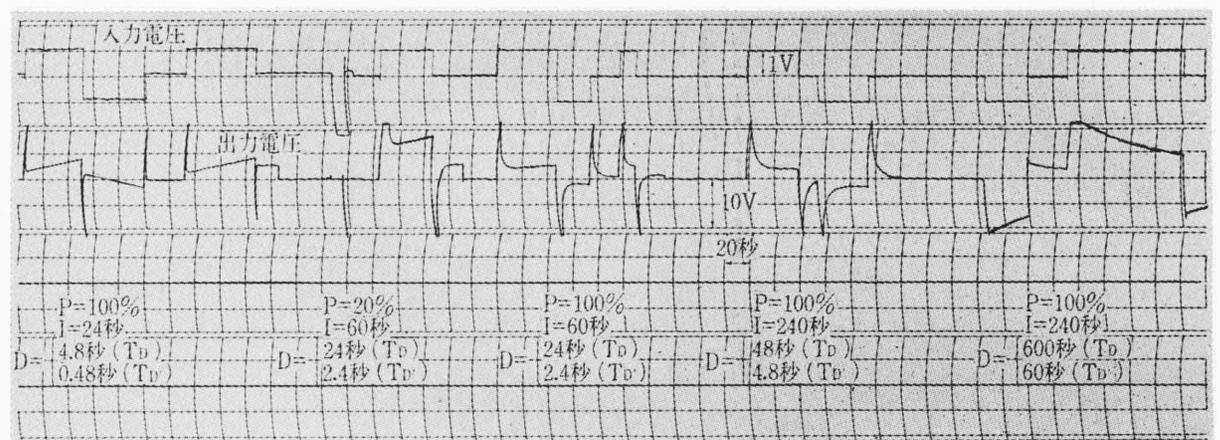
第10図 原子炉シミュレータ制御



第11図 磁気増幅器式PID制御器のステップ入力特性 その1: 積分器出力特性



第12図 磁気増幅器式PID制御器のステップ入力特性 その2: 微分器出力特性



第13図 磁気増幅器式PID制御器のステップ入力特性 その3: 加算器出力特性

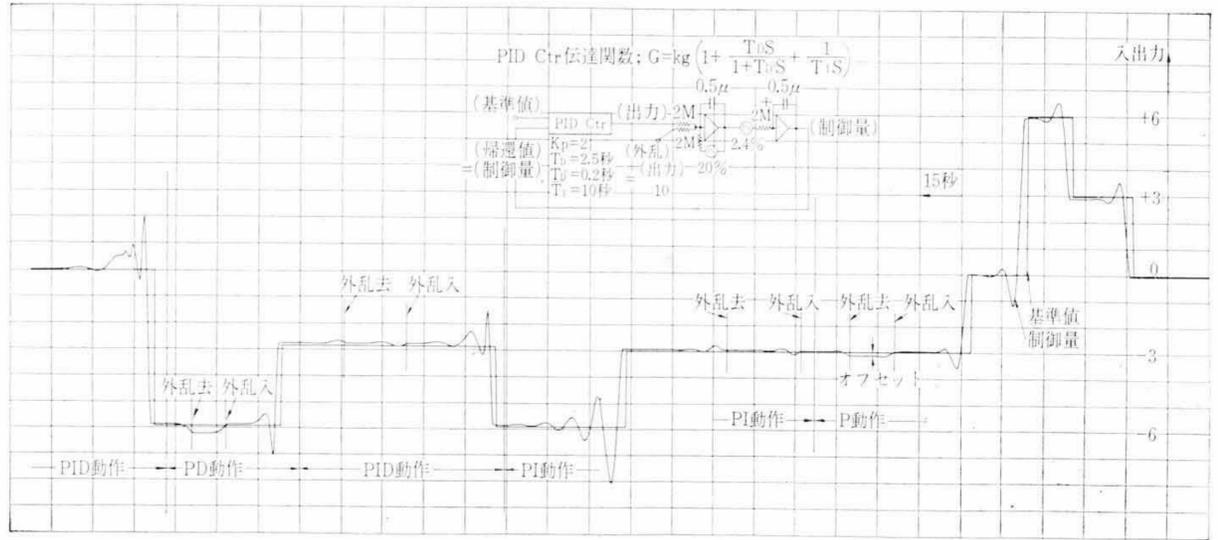
5. 特性試験結果

(a) 開ループ動作試験

第 11~13 図は磁気増幅器式 PID 制御器を自動制御系にそう入せずに入力にステップ電圧を加えたとき、積分器、微分器、加算器、それぞれの出力について各定数をパラメータにとり記録している。

(b) 閉ループ試験

磁気増幅器式 PID 制御器の実際の使用状態における特性（閉ループ特性）について被制御系をアナログシミュレータによって模擬し、記録されたものが第 14 図である。P, PI, PD, PID 各制御の特長がはっきり現われている。



第 14 図 磁気増幅器式 PID 制御器閉ループ特性 (制御系はアナログシミュレーションによる)

6. 結 言

わが国においても計算制御が進み、そのために大規模なデジタル計算機が用いられるすう勢にある。しかし制御の末端では遅滞なき目標値制御を高信頼度をもって行なう必要があり、そのための磁気増幅器式 PID 制御器は今後ますます需要の増加が予想される。本稿では商用サイクル用磁気演算増幅器を用いた例について述べた

が、より応答の速い用途に、1 kc 励磁磁気演算増幅器を用いたものも開発中である。

最後に開発に対しご指導いただいた中央研究所 81 研究室三浦主任 研究員、平野研究員、日立工場 泉副工場長、桧垣技術部長、佐野主任各位に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 奈良：電連，283 (昭 38)
- (2) 三浦，平野，佐野：日立評論 44，127~136 (昭 37-7)



特 許 の 紹 介



特 許 第 402522 号

井 上 清・真柄 政 伸
堀 口 和 男

ベ ル ト 起 電 機

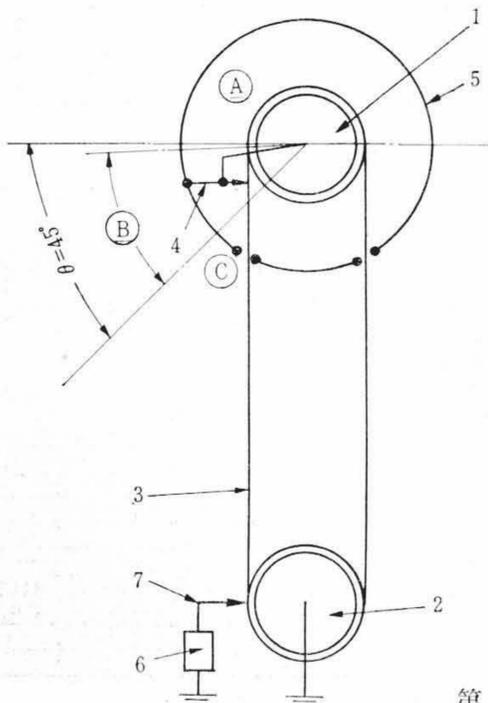
バンデグラフ形ベルト起電機における集電荷子は、その取付位置によって特性上に重大な影響をおよぼすことは知られているが、従来その最適位置については解明されていなかった。

すなわち、上部プーリー 1 と下部プーリー 2 とへ架設されたベルト 3 へ、電源 6 より電荷撒布子 7 を介して電荷を供給し、この電荷は、集電荷子 4 によって高圧電極 5 内へ集められるわけであるが、従来、集電荷子 4 の取り付けは、ベルト 3 の A とか C 部分に対応して配置されていた。

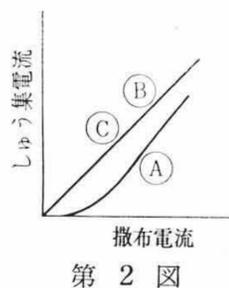
ところが、集電荷子 4 を A で示すように上部プーリー 1 とベルト 3 とが接触する範囲外の外側位置に設けた場合には、集電荷子 4 と上部プーリー 1 との影響によって、集電荷子 4 とベルト 3 との間にコロナ放電が生起し難くなって、電荷を十分に集め得なくなり、第

2 図 A 曲線に示すように集電荷能率が悪くなり、また第 3 図 A 曲線に示すように撒布電流に対するベルト起電機の電圧特性が悪くなっていた。さらに、集電荷子 4 を C で示すように上部プーリー 1 よりずっと低い位置へ取り付け付けた場合は、集電荷能率は高まるが、ベルト 3 に沿う沿面放電を生起し易く、第 3 図 C 曲線に示すように起電機の発生電圧を十分に上げることができない。

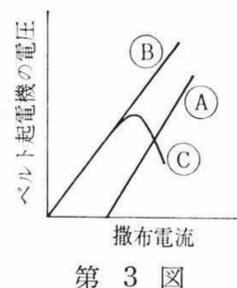
この発明は、集電荷子 4 を第 1 図 B に示すように、上部プーリー 1 の中心位置に対して俯角 45° 以内で、かつ上部プーリー 1 とベルト 3 とが接触していない範囲内のベルト外側位置に取り付けて、これを解決したもので、この発明によれば、集電荷能率は、第 2 図 B 曲線に示すように良好となり、また起電機電圧も第 3 図 B 曲線に示すように十分高くし得る。(須田)



第 1 図



第 2 図



第 3 図