

下水道システムにおける機械設備及び電動機の制御

Control Systems for Machinery and Drives in Wastewater Treatment Systems

下水道システムにおいて電力消費量の大部分を占め、且つ機械設備の代表である曝気用ブロワと汚水、雨水及び汚泥ポンプを取りあげ、システム全体の確実・容易、コスト低廉な運転のために強く要請されている機械設備の運転信頼性の向上、省エネルギー、メンテナンスフリーの面から、その制御方式と駆動装置のあり方について考察した。

代表的駆動装置である電動機については、サイリスタ及び集積回路の進歩によってパワーエレクトロニクスによる速度制御が広く採用されるようになった。サイリスタモータ並びにサイリスタコントローラは瞬時停電対策、力率補償、高調波対策などの安全制御のもと信頼性向上、省エネルギー及びメンテナンスフリーを実現し、下水道システムに適したものである。

後條 哲夫* Tetsuo Gojô
堀 孝正** Takamasa Hori
宮田俊夫*** Toshio Miyata
梓沢 昇**** Noboru Azusawa

1 緒 言

下水道システムの処理水量の増大、広域化、あるいは排除区域の増大による管渠の深部埋設などによって機械設備及び駆動装置の容量、並びに使用電力量は大幅に増加している。例えば昭和48年度、東京都区部における総使用電力量は313,000 MWHに達し、その内訳は曝気用ブロワ44%、汚水及び雨水ポンプ36%、汚泥処理施設12%、照明8%となっている⁽¹⁾。この機械設備、及び駆動装置の運転に当たっては常に下水道システム全体の運転の観点から、次の条件を満足させることが重要である。

- (1) 安全性の確保
平常時、異常時及び緊急時における運転の信頼性・稼働率の向上、並びに故障時におけるシステム運転の確保。
- (2) 省エネルギー
効率の向上、電力消費量の節減。
- (3) メンテナンスフリー
保全が全く不要か、あるいはわずかで済み、且つ容易に行

なえること。
これらの条件はすべて下水道システムの公共的使命の達成、資源の節約、建設及び運転用財源の確保につながるものである。これを実現するための制御のあり方が重要であるが、この概要を表1に示す。

2 曝気用ブロワ

曝気用ブロワは下水道システムにおける電力消費量の比率が最も高いにもかかわらず、従来連続運転の例が多い。汚水量及び汚水水質の変動に基づく送風量の変動に対して、運転台数の制御と吸込ベーンダンパ、あるいは駆動電動機制御を併用することによりきめ細かい省エネルギーを実現できる。
図1に曝気槽系列ごとに溶存酸素濃度/送風量制御を実施し、ブロワに対しては吐出しヘッド圧力/運転台数+吸込ベーンダンパ制御を行ない、曝気槽系列ごとの送風量制御が相互干渉を生じないように考慮するとともにブロワ運転における省エネ

表1 下水道システムにおける機械設備及び駆動システム 下水道システムにおける機械設備
駆動システム及びその運転の目標を実現するための制御の重点を示す。

施 設	機 械 設 備	単 機 容 量 (kW)	駆 動 方 式	使用電力量 総使用電力量(%)	制 御 の 重 点	
下 水 処 理	曝 気 プ ロ ワ	200～500～1,500	電 動 機	44	汚 水 量 汚水水質 } 変動／送風量変動／ 運 転 台 数 吸込ダンパ 度 } 制御	
ポ ン プ	汚 水 ポ ン プ	数十～200～1,600	〃	36	汚水量変動／ 運 転 台 数 速 度 } 制御	
	雨 水 ポ ン プ	数十～300～1,600	〃		降雨時迅速確実に 始動 降雨時迅速確実に 始動 停電時の運転確保	雨水量変動／ 運 転 台 数 速 度 } 制御
		数十～750～5,000	ディーゼル機関			
汚 泥 処 理	汚 泥 ポ ン プ	55～150	電 動 機	12	送泥量変動／ 運 転 台 数 運 転 時 間 (間 欠) 速、 度 } 制御	
	真 空 ポ ン プ				連続運転（真空脱水機用）	
そ の 他	照 明	—	—	8	—	

* 大阪市下水道局大野処理場 場長 ** 日立製作所日立研究所 工学博士 *** 日立製作所日立工場 **** 日立製作所大みか工場

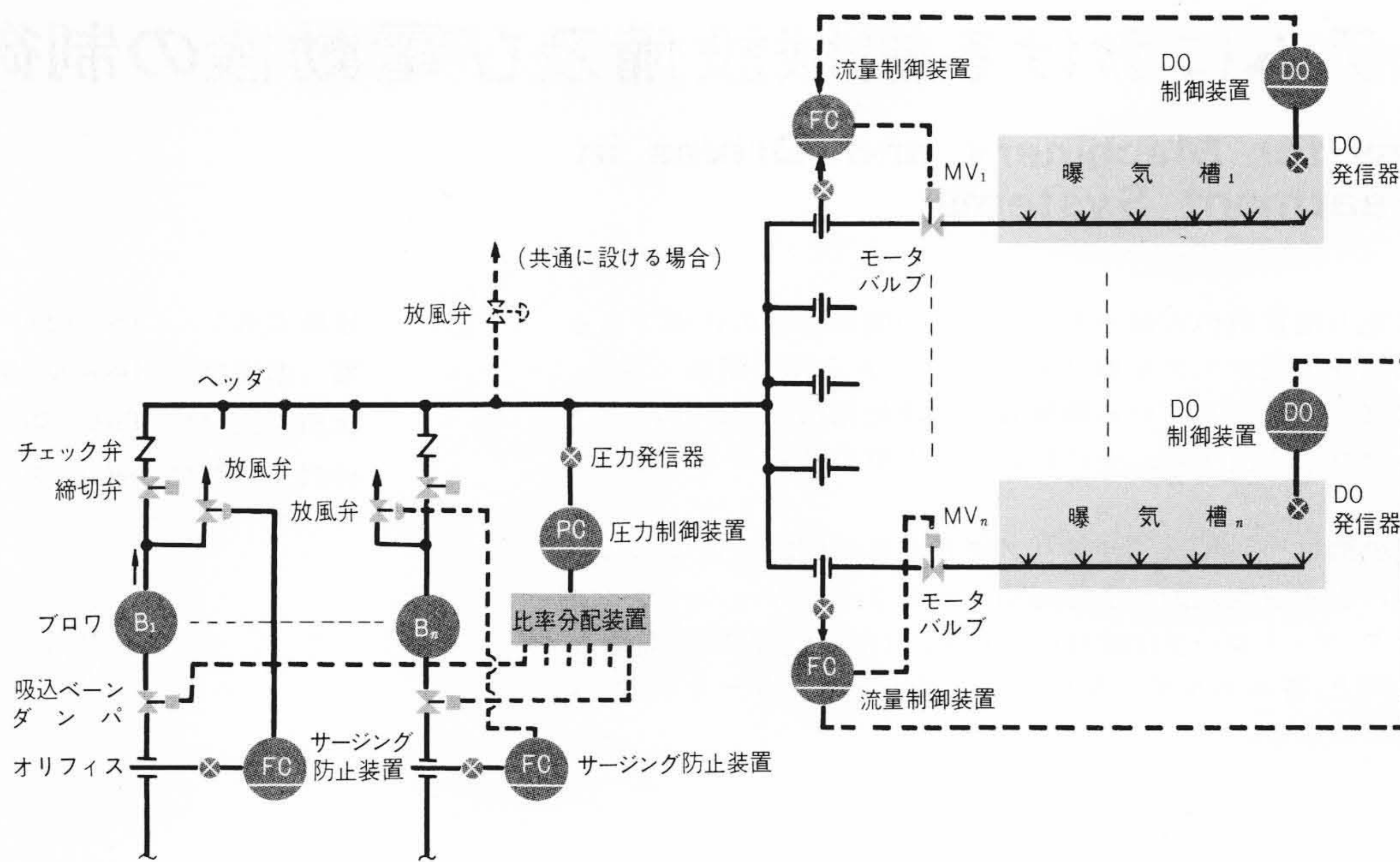


図1 曝気槽及びブロワの制御方式 曝気槽系列ごとに溶存酸素濃度/送風量制御を、ブロワには吐出しヘッダ圧力/運転台数+吸込ベーンダンパ制御を実施した例を示す。

ルギーを実現した例を示す(特許出願中)。なお、サージング防止のため過少流量制限を併用している。

図2に遠心形ポンプ及びブロワの吐出し圧力/流量特性を示す。ブロワにおいても電動機速度制御を実施すれば、更に省エネルギーを実現できるが、現状では吸込ベーンダンパ

制御によって中間的なコスト パフォーマンスの実現を図ることが实际的である。しかし、ブロワ単機容量が大幅に増大する傾向にあり、2,000kWを超過すれば電動機速度制御を行なうものが増加するものと考えられる。

表2 パワーエレクトロニクスによる電動機速度制御 下水道システムのブロワ、ポンプ駆動用パワーエレクトロニクス電動機速度制御の比較により各の特長を知ることができる。

制 御	周 波 数 制 御 方 式		電 圧 制 御 方 式			
	かご形誘導電動機の制御 (アシンクロサイリスタモータ)	同期電動機の制御 (シンクロサイリスタモータ)	かご形誘導電動機の 一次電圧制御 (VV形サイリスタモータ)	巻線形誘導電動機の二次電圧制御		
				IMサイリスタコントローラ	静止セルビウス	クレーマ
構 成						
特 性						
速 度 範 圍	10~100%	10~100%	70~100%	65~100%	65~100%	70~100%
容 量	300kW以下	実用上制限なし	100kW以下	300kW以下	実用上制限なし	同 左
特 長	1. ブラシレスによるメインテナンスフリー 2. 瞬時停電後の回復が速い。 3. 電流制限によるソフトスタートができる。 4. 定速運転のバックアップ運転が容易。	1. 同 左 2. 同 左 3. 同 左 4. 精度が良い。 5. 高速運転ができる。	1. ブラシレスによるメインテナンスフリー 2. 定速度のバックアップ運転が容易。 3. 設置面積が小さい。	1. 高圧電動機の使用ができる。 2. 設置面積が小さい。 3. バックアップ運転が容易。 4. 二次回路無接点によるメインテナンスフリー	1. 同 左 2. バックアップ運転が容易。 3. カスケードセルビウスはブラシレスとなる。	1. 同 左 2. 速度範囲の狭いものに適している。 3. 無整流子クレーマは保守が容易。

3 汚水・雨水・汚泥ポンプ⁽²⁾

台風あるいは集中豪雨時、万一停電しても排水区の冠水を防止するために運転を継続する必要がある雨水ポンプには、ディーゼル機関駆動が採用されるが、一般に汚水・雨水・汚泥ポンプ駆動用には三相誘導電動機が採用される。ポンプにおいては、ブロウのような吸込ベーンダンパは存在しないから、運転台数+電動機速度制御が広く採用される。

最近のサイリスタ、集積回路などの進歩により、パワーエレクトロニクスによる三相誘導電動機速度制御が広く用いられるようになった。表2にこの各方式を示す。

静止セルビウス及びクレーマ方式は上水道システムにおいて、比較的大容量の取水、導水、送配水及び増圧の各ポンプに広く採用されてきた。最近、メンテナンスフリー化の強い要求により、スリップリング、ブラシ、整流子などのないカスケード接続静止セルビウス⁽³⁾、サイリスタクレーマ方式、並びにサイリスタモータ⁽⁴⁾の採用が増加している。また電源システムの区間外故障除去時間などの瞬時停電時、セルビウス方式における比較的永い運転回復時間特性の改善、あるいは長距離送水システムに対し電動機側で適切なフライホイール効果を容易に付与し、サージタンクを省略でき用地、建設費の節減を図ることができるなどの新しい有利な観点からもサイリスタクレーマ方式、あるいはサイリスタモータの採用が増加している。

下水道システムにおいては、表1に示すように電動機容量が比較的小さいから、安全性、省エネルギー及びメンテナンスフリーの観点から、シンクロ形、あるいはアシンクロ形サイリスタモータ、並びにチョップ制御方式のサイリスタコントローラが容量、回転数、速度制御範囲、コストなどを総合的に比較検討のうえ、採用される例が増加した。以下にその概要を述べる。

4 サイリスタモータ

4.1 アシンクロ形サイリスタモータ

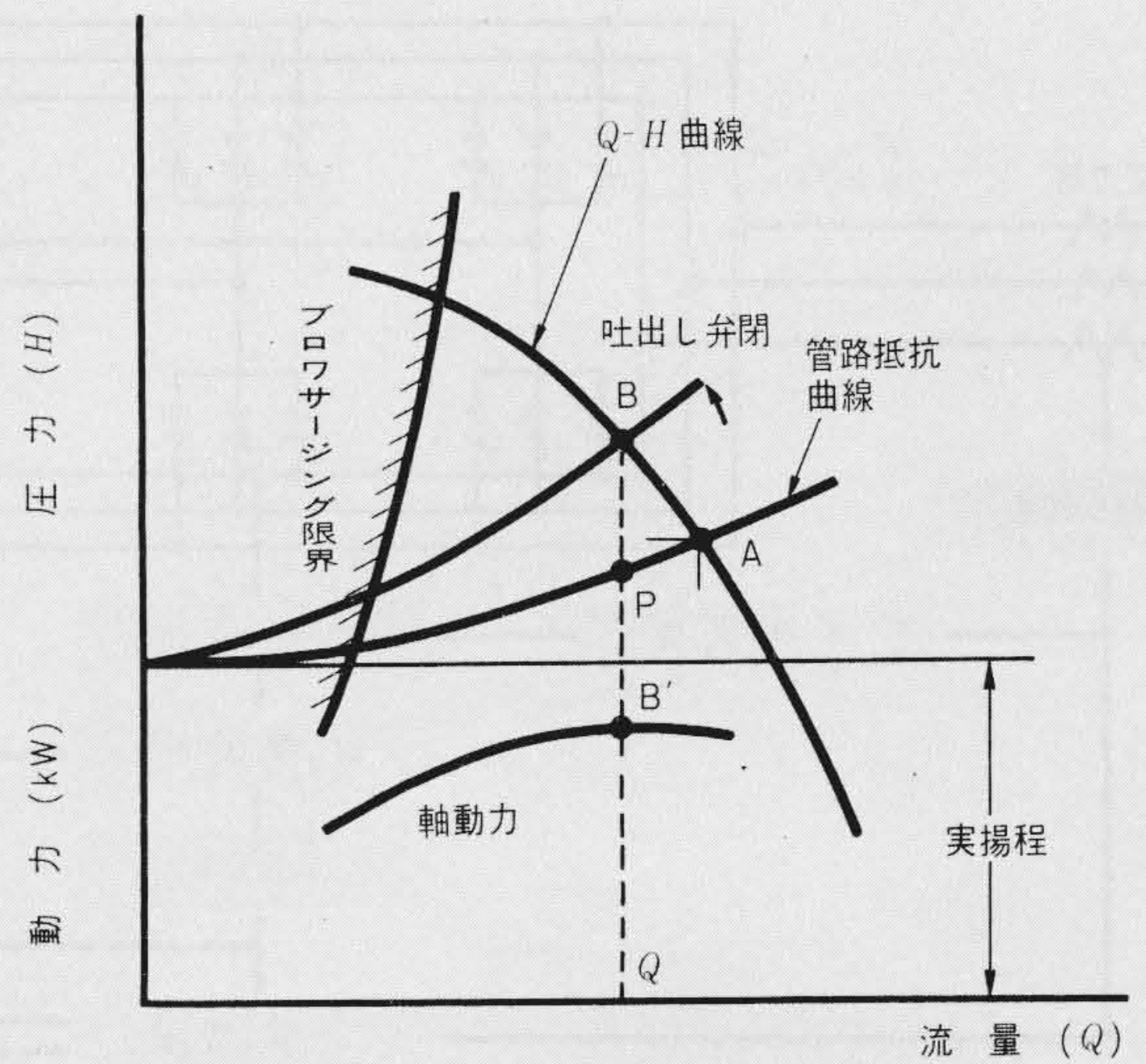
アシンクロ形サイリスタモータは、かご形誘導電動機とサイクロコンバータにより電圧及び周波数変換して速度制御する方式である⁽⁴⁾。

この方式の主回路及び制御装置の構成を図3に示す。速度指令である自動パルス移相器の出力と、電圧-周波数変換器の出力との論理積がサイクロコンバータ部のサイリスタ素子のゲート信号となり、商用交流電源を可変周波数、可変電圧の交流に変換する。

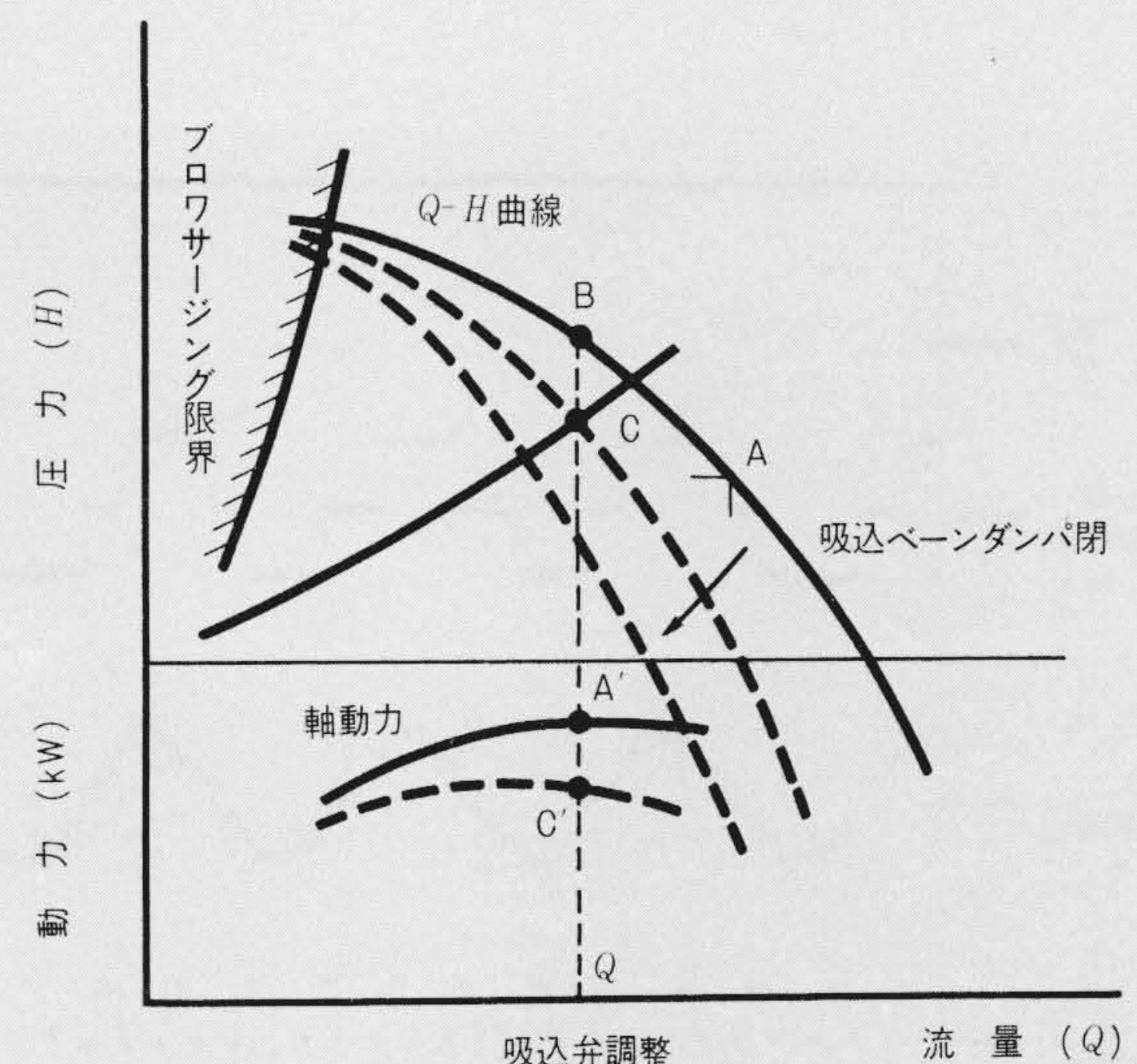
サイリスタの転流は電源電圧によって行なわれる電源転流であるから、最高出力周波数は電源周波数の約 $\frac{1}{2}$ 以下に制限される。ソフトスタート、過電流防止を行なう電流制御、電動機に供給する電圧と周波数の比を調整する電圧/周波数制御、設定速度と電動機速度を調整する速度制御が行なわれる。

電動機の構造は、一般のかご形誘導電動機と同様でブラシレス構造であり、サイクロコンバータ、制御装置はすべてエレクトロニクス化され、無接点化、メンテナンスフリー化が実現される。サイクロコンバータによる電力変換であるから瞬時停電に対する耐力、及び回復特性が特に優れている。定格速度が商用周波数の $\frac{1}{2}$ 以下の範囲となるが、300kW程度以下においてはメンテナンスフリーと堅固な体質が得られ、実用上コストパフォーマンスが高い。

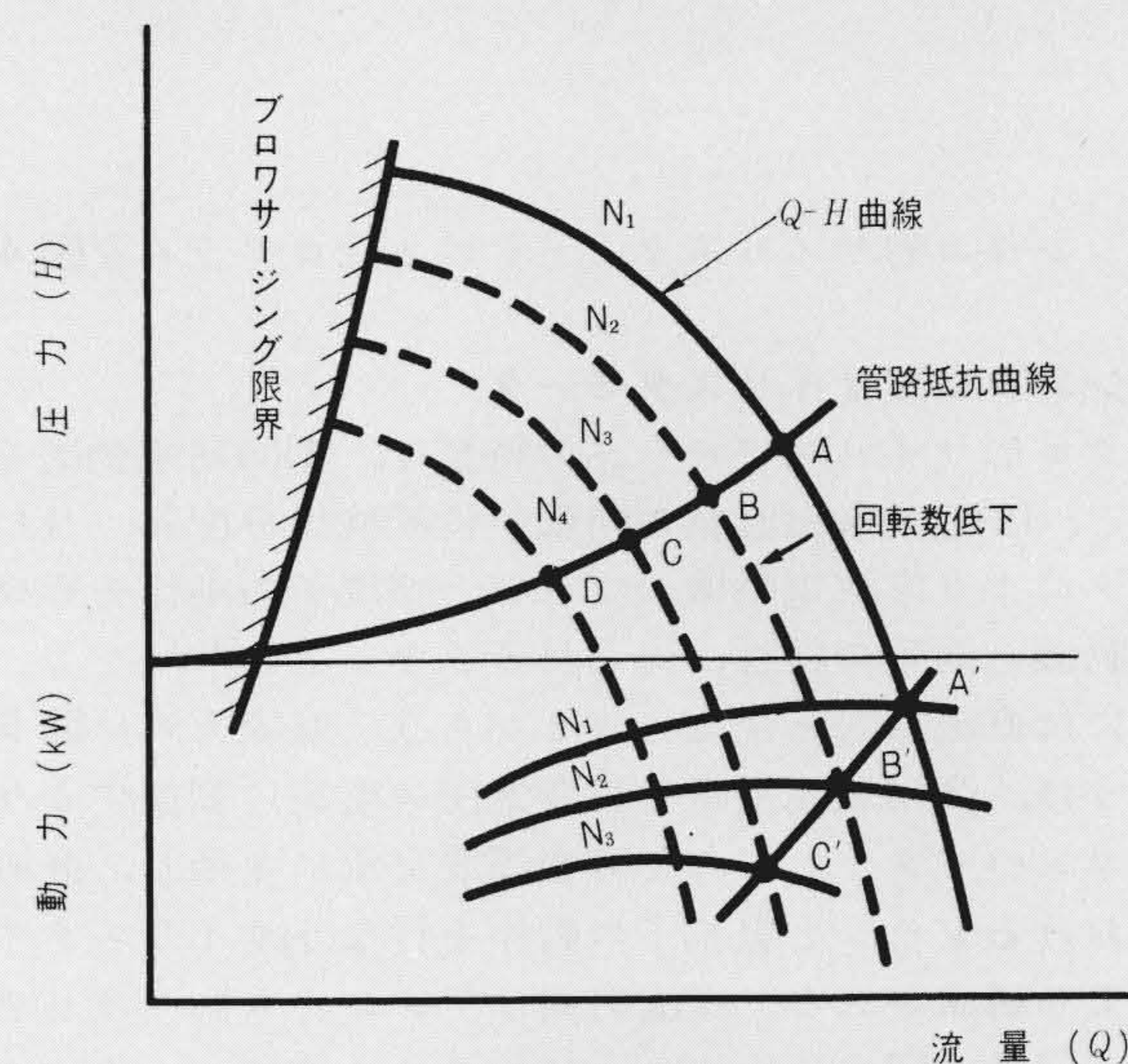
大阪市下水道局大野処理場に納入した 80 kW 返送汚泥ポン



(a) ポンプ、ブロウの吐出し弁制御



(b) ブロウ吸込ベーンダンパ制御



(c) ポンプ、ブロウ回転数制御

図2 遠心形ポンプ及びブロウの圧力/流量特性 ポンプ及びブロウにおける吐出し弁、速度制御及びブロウにおける吸込ベーンダンパ制御を実施した場合の圧力/流量特性及び軸動力特性を示す。

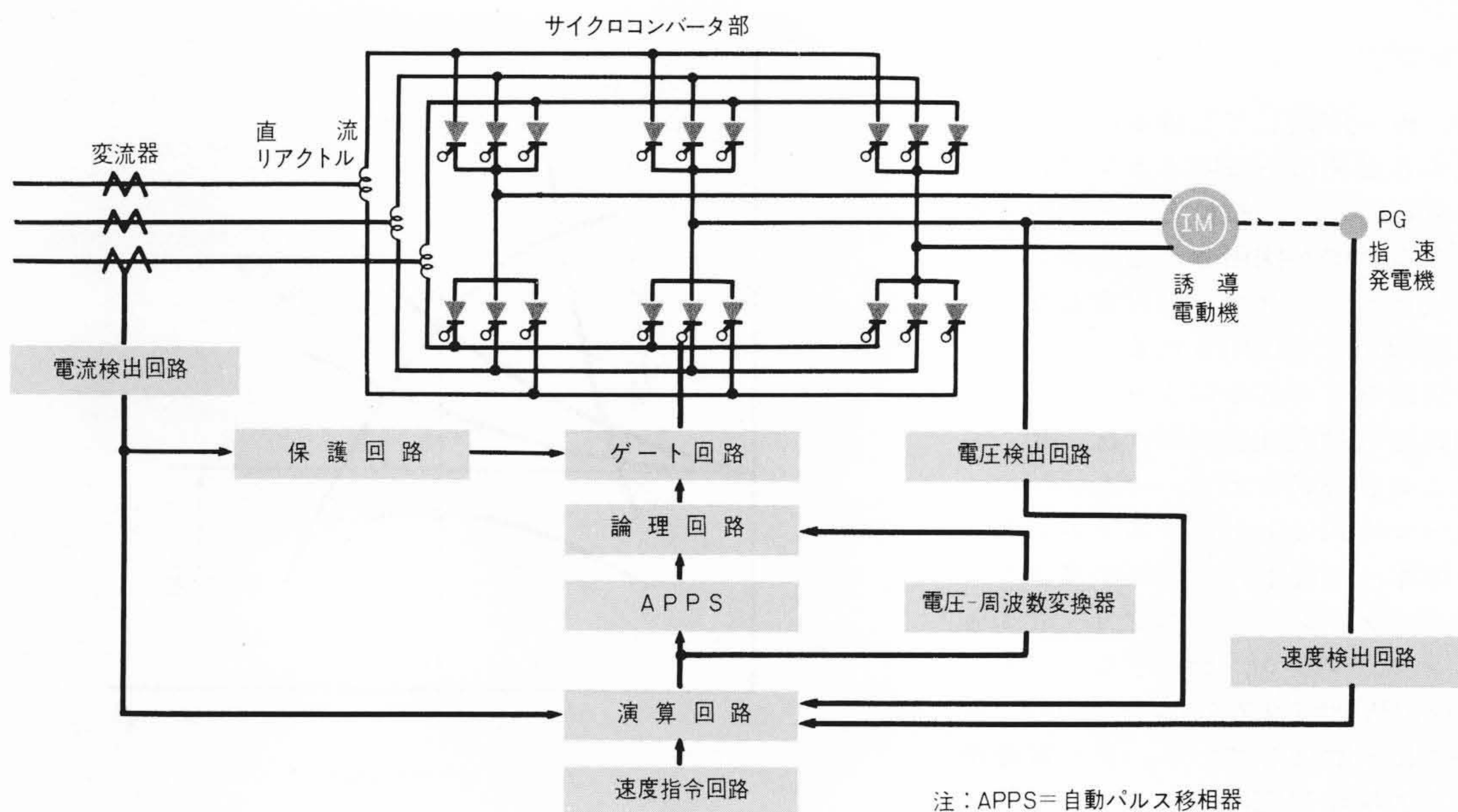


図3 アシクロ形サイリスモータの構成
電圧-周波数変換器で電動機の周波数が与えられる。

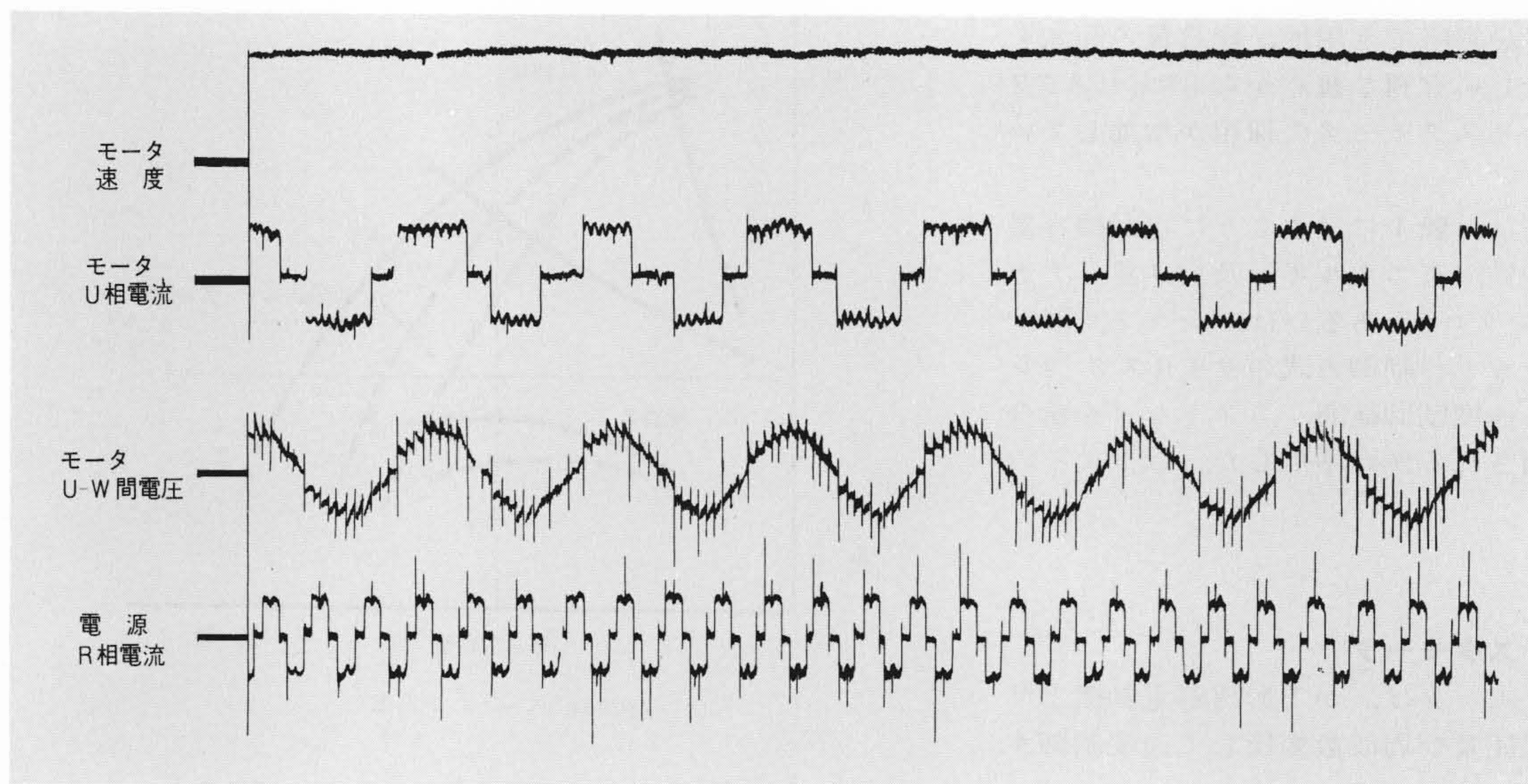


図4 アシクロ形サイリスタモータのオシログラム
大阪市下水道局大野処理場納め80kW返送汚泥ポンプ用アシクロ形サイリスタモータのオシログラムを示す。

プ用アシクロ形サイリスタモータのオシログラムを図4に示す。

4.2 シンクロ形サイリスタモータ

シンクロ形サイリスタモータの特長は、(1)同期電動機を用いること、(2)電動機軸直結の回転子位置検出分配器、及びサイリスタにより直流電動機のブラシと整流子の動作を置換し直流電動機と同等の特性が得られることである⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

構成には直流方式と交流方式とがあり、直流方式は図5に示すように、商用周波電源を可変電圧の直流に変換するサイリスタコンバータと、これを可変周波交流に変換し、直流電動機におけるブラシと整流子の動作を行なうサイリスタインバータより構成される。交流方式はアシクロ形サイリスタモータと同様、図6に示すようにサイクロコンバータによって商用周波電源を可変周波、可変電圧交流に変換して同期電動機に与えるものである。

直流方式における転流は、起動時及び低速時にはインバータ部に流れる直流電流をコンバータ部で断続させて行なわれ、中・高速時には電動機の逆起電力を利用した負荷転流で行な

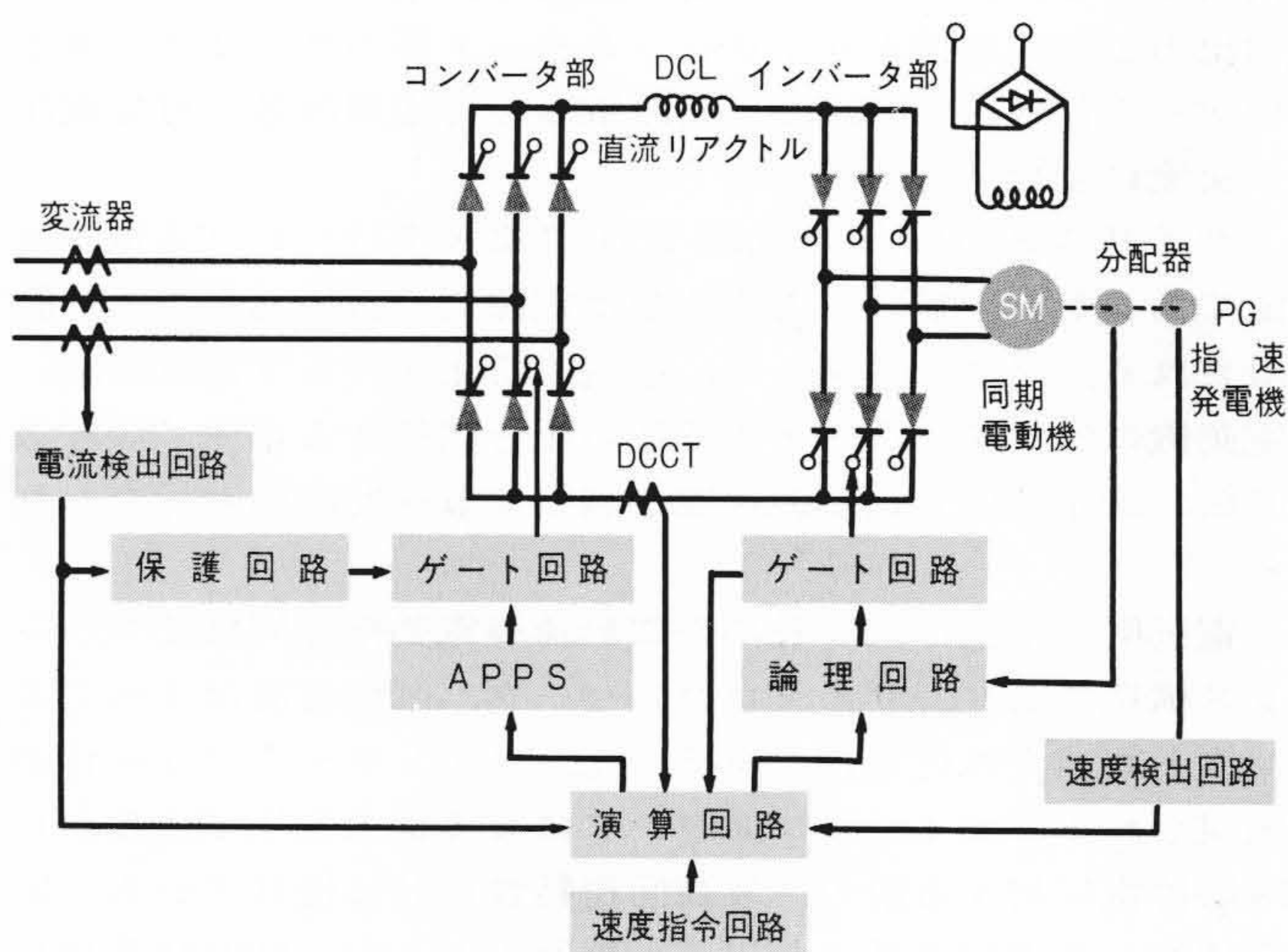


図5 直流方式シンクロ形サイリスタモータの構成
演算回路で電流断続制御も行なう。

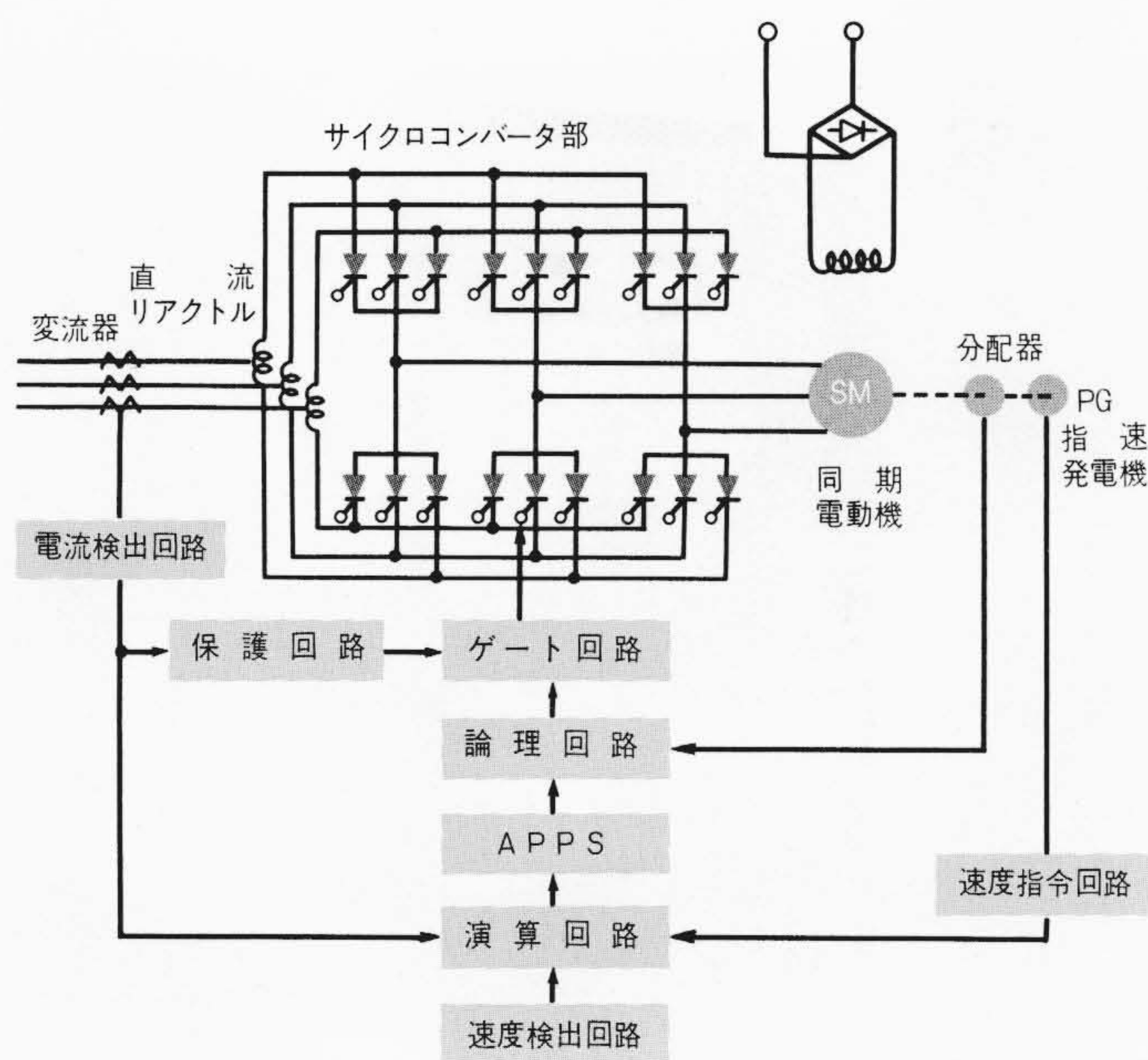


図6 交流方式シンクロ形サイリスタモータの構成 演算回路では電流制御，速度制御を行なう。

われる。

交流方式ではアシンクロ形サイリスタモータと同様、電源転流により起動時、及び低速時には運転され、中・高速時は主として負荷転流により運転される。電動機はブラシレスとし中・小容量用にはクローポール形を、大容量用にはブラシレス励磁形を適用する。**図 7** にクローポール形回転子を示す。

ブラシレス励磁形は同期電動機回転子のほか交流励磁機並びに回転整流器を備えている。

直流方式の特長は、(1)図 6 に示すようにサイリスタ変換器が簡単である。(2)低速では断続始動のため電源へのじょう乱が大きいが、常時運転速度範囲である中・高速時には高調波による電源への影響が小さいことである。

交流方式の特長は(1)転流が電源転流と負荷転流の両方で行

なわれているので、転流失敗をしても自己回復力が高い。(2) 低速から高速までの全速度範囲で高精度な運転ができることである。図 8 は大阪下水道局平野処理場に納入した 90kW 汚水ポンプ用交流方式シンクロ形サイリスタモータのオシログラムである。

5 誘導電動機用サイリスタ コントローラ

誘導電動機用サイリスタコントローラは、図 9 に示すように、巻線形誘導電動機の二次側にサイリスタ チョッパ回路を設け、抵抗を無段階・無接点調整を行ない、電動機のトルク-速度特性を変え、速度制御を行なうものである。

図10(a)で示すように、二次側の抵抗を変え、トルク-速度特性を変えて速度制御するものであるが、図10(b)(c)においてスイッチ(S)の開閉に従って、二次電流は I_1 、 I_2 のように変化する。またSの開閉時間を変化すると平均電流 I_0 を変化させることができる。これは、等価的に抵抗を変化させたことに等しく、従って速度制御が可能となる。誘導電動機用サイリスタコンローラは、このスイッチSをサイリスタに置き換え、

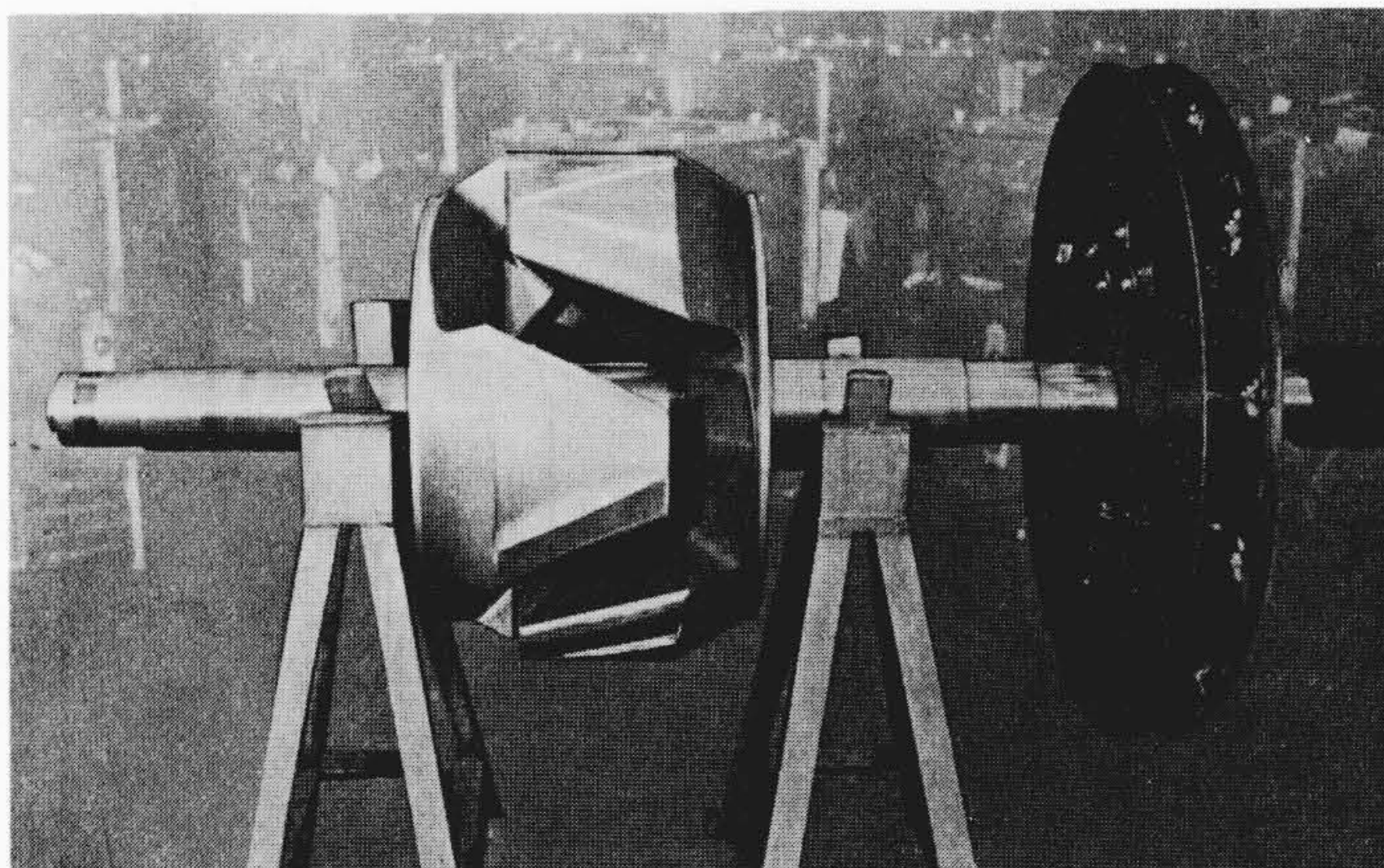


図7 クローボール形回転子 クローボール形回転子は、中・小容量サイリスタモータに適し、ブラシレスを実現できる。

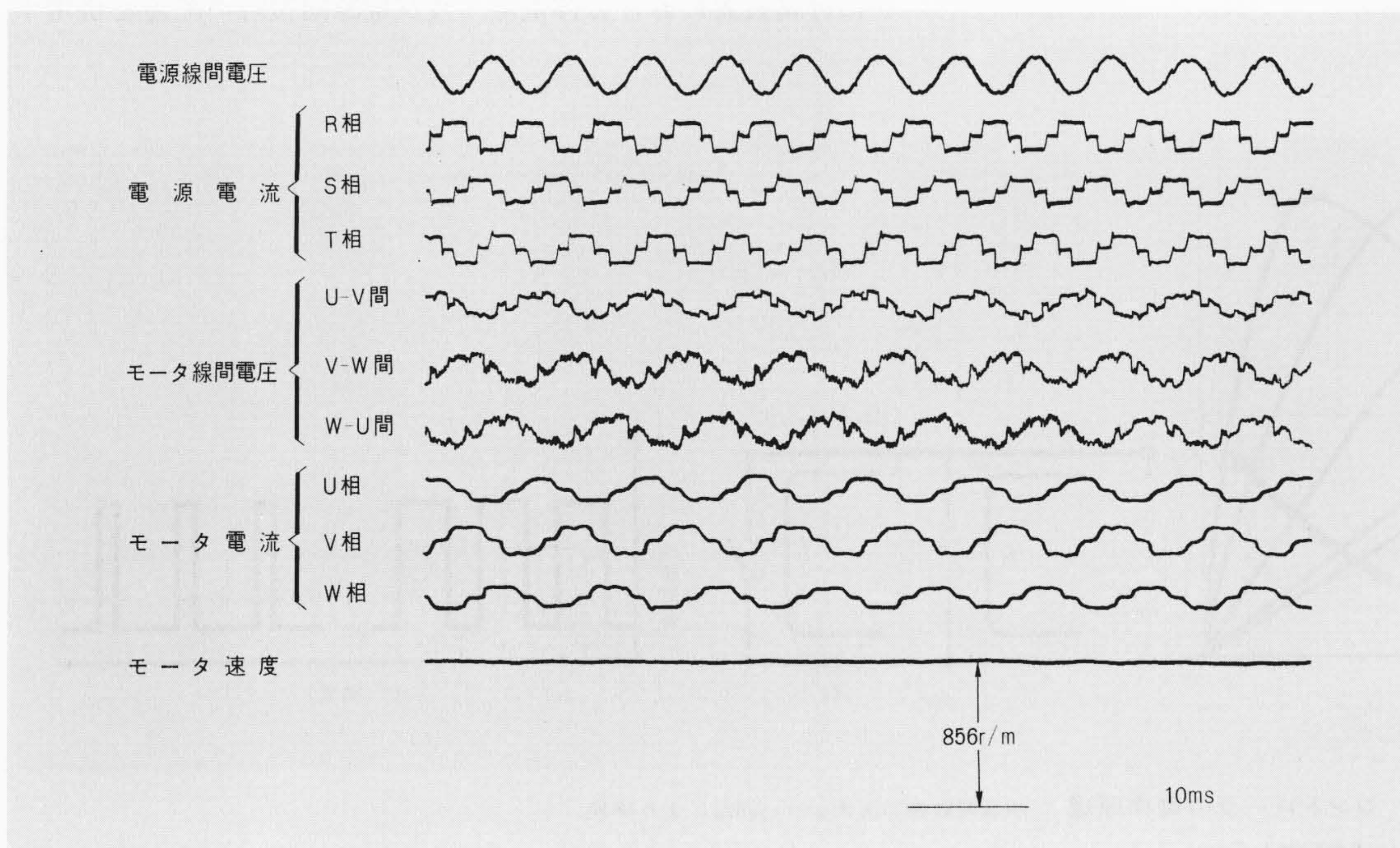


図 8 シンクロ形サイリスタモータのオシログラム
大阪市下水道局平野処理場納め
90kW汚水ポンプ用シンクロ形サイリスタモータのオシログラム
を示す。

この開閉をチョッパ制御で行なったものである。従って、その動作を無接点で高速に行なうことが可能となり、しかも、連続的に可変速制御ができる。簡単な構成で連続速度制御が可能であり、300kW程度以下においては実用上コストパフォーマンスが高い。

図11は、誘導電動機用サイリスタ コントローラを示す。

6 電動機運転における安全制御

6.1 瞬時停電対策

電源系統の区間外故障の除去時間など数ヘルツ～1秒程度のいわゆる瞬時停電が発生した場合、通常はしゃ断器をしゃ断し、ポンプ電動機を停止させ、電源回復後再始動、再加速を行なう。停電としては1秒以下であっても、ポンプ設備としては電動機の再加速時間、ポンプ設備の始動シーケンス制御時間、弁の開閉時間などを合計すると機械設備全体の停止、再始動には数分を要する。この結果、システム全体として上水道の場合、断減水、浄水場におけるろ過プロセスのじょう

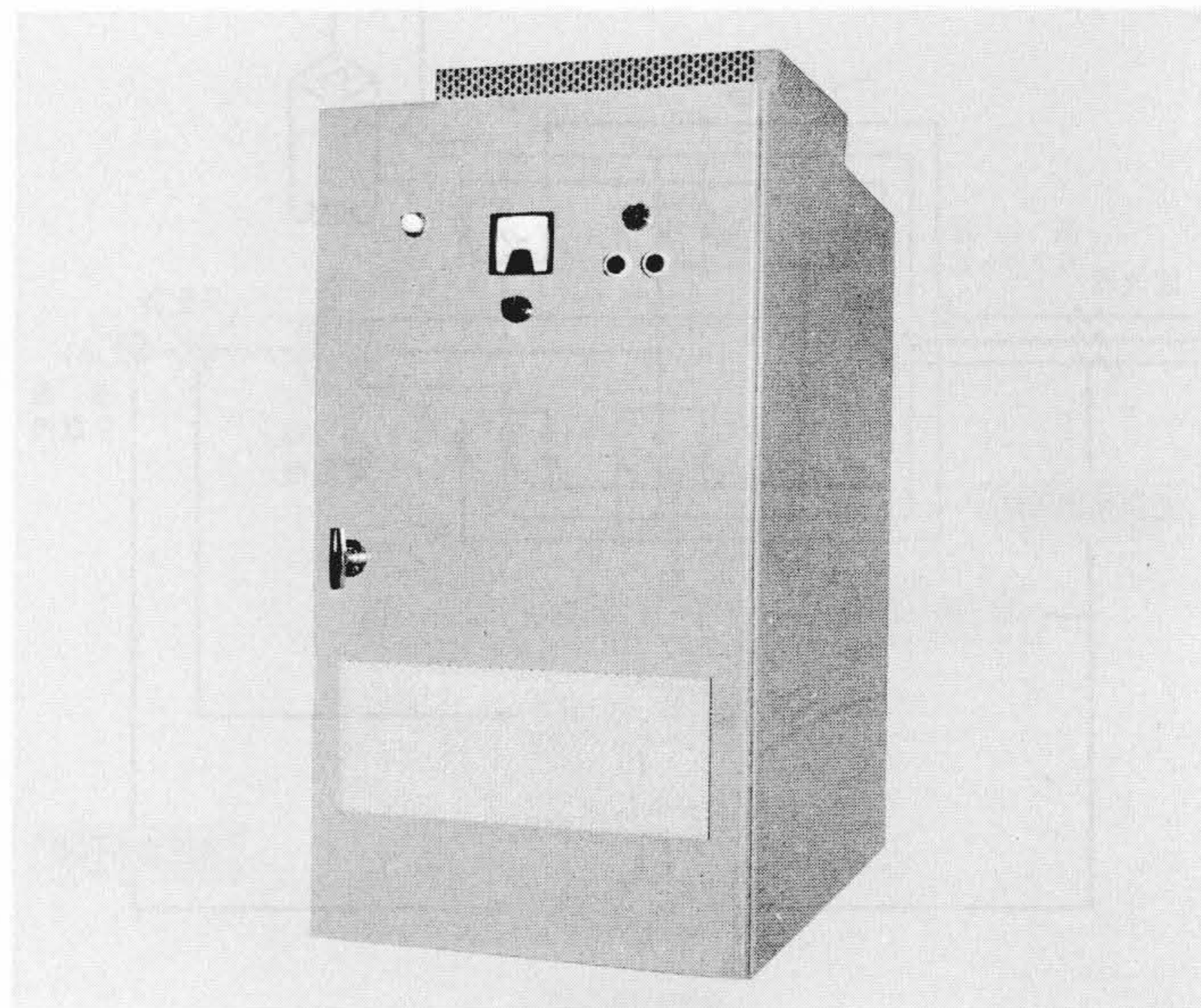


図11 誘導電動機用サイリスタ コントローラ 小形の装置により無接点、メンテナンスフリーの誘導電動機速度制御を行なうことができる。

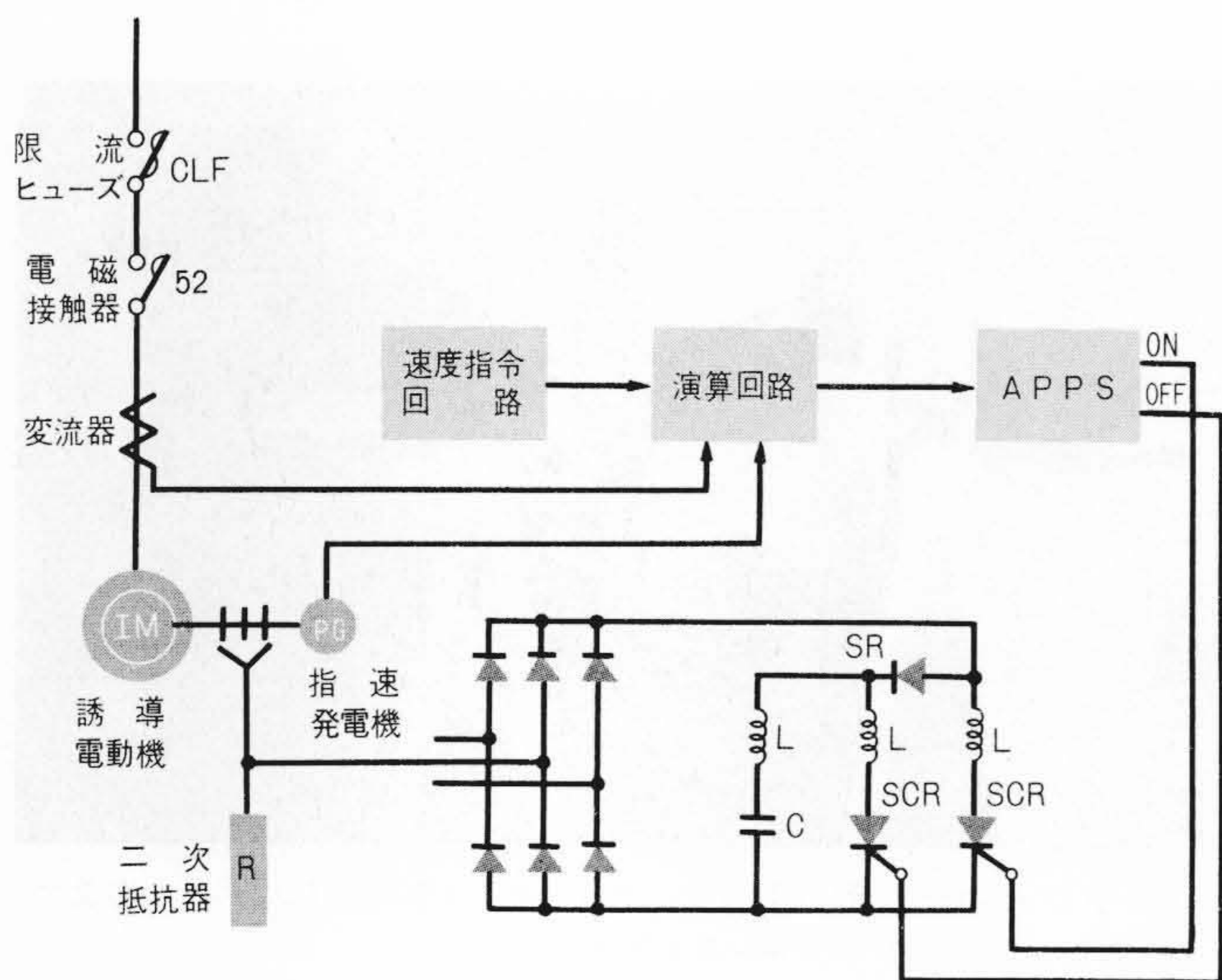


図9 誘導電動機用サイリスタ コントローラ 巻線形誘導電動機の二次をチョッパ回路で短絡し、平均電流を連続的に変化させ無段階速度制御を行なう。

乱、下水道の場合、排除区域の冠水、処理場における処理プロセスのじょう乱、送汚量の変動導へ発展し、また運転操作上も混乱を生じトラブルの拡大を招くケースがある。

システム運転の信頼度の向上を図るため、瞬時停電、回復時の機械設備全体の運転回復時間特性を極力短縮するよう改善を図ることが重要であり、このため、システム計画を最適化するよう土木、機械、電気及び制御の各分野の調和が重要である。電気・制御部門においてはサイリスタ、集積回路の利用技術の向上によりパワーエレクトロニクスによる電動機制御が確立されつつあることは上記のとおりであるが、この場合、瞬時停電回復時の安全制御は表3に示すとおりである。すなわち、サイリスタの高速度、且つフレキシブルな制御、例えば停電期間サイリスタをゲート サブレスして停止し電源回復後制御装置を円滑に元の状態に回復すること、並びに付属装置における停電時、及び電源回復時の配慮を併用す

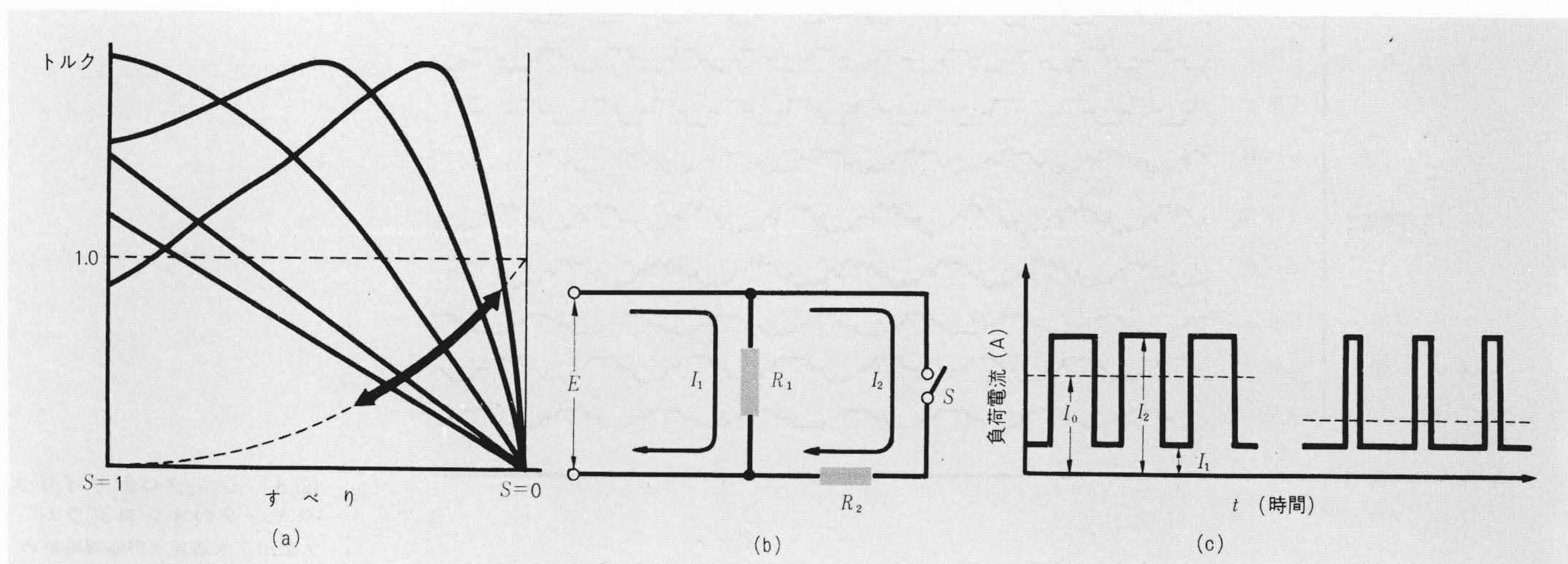


図10 誘導電動機用サイリスタ コントローラの動作原理 誘導電動機二次チョッパ回路により平均電流を変え、トルクを変化させて連続速度制御を行なう。

表3 パワーエレクトロニクスによる電動機速度制御システムにおける瞬時停電及び電圧回復時の安全制御
回復時の安全制御 瞬時停電発生時は、電圧回復時、円滑・迅速に正規運転へ復帰するための安全制御の各方式を示した。

方 式	瞬時停電時及び電圧回復時の安全性制御	付 属 装 置 に 対 す る 注 意
アシンクロ形サイリスタモータ	1. 停電でサイリスタのゲートをサプレスして制御装置停止 2. 電源回復後制御電圧確立でモータ加速し元の速度に復帰	1. しゃ断器を採用する。 2. 接触器は機械的保持形とする。 3. 無停電操作電源とする。
シンクロ形サイリスタモータ	1. 停電でサイリスタのゲートをサプレスして制御装置停止 2. 電源回復後制御電圧確立及び界磁電流確立でモータ加速し、元の速度に復帰	1. しゃ断器を採用する。 2. 接触器は機械的保持形とする。 3. 無停電操作電源とする。 4. 界磁電源を無停電電源とすると復帰時間が短縮できる。
IMサイリスタコントローラ	1. 停電でサイリスタゲートをサプレスし制御装置停止 2. 電源回復後制御電圧確立で加速復帰 (但し、速度が可変範囲外であると再起動モードとなる)	1. しゃ断器を採用する。 2. 接触器は機械的保持形とする。 3. 無停電操作電源とする。
静止セルビウス	1. 停電でしゃ断器及び高速しゃ断器しゃ断二次側始動用抵抗を投入し制御装置停止 2. 標準仕様では電源回復で自動始動再加速復帰	1. 操作電源を無停電電源とする。 2. 停電で起動用抵抗を投入する。 3. 整流器をサイリスタにし、ゲートサプレス操作で自動復帰ができる(サイリスタの耐圧値を慎重に検討選定する必要がある)。
クレーマ	1. 停電でサイリスタゲートをサプレスし制御装置停止 2. 電源回復後制御電圧確立及び界磁電流確立で加速復帰 (但し、速度が可変範囲外のときは再起動モードとなる)	1. しゃ断器を採用する。 2. 接触器は機械的保持形とする。 3. 無停電操作電源とする。 4. 界磁電源を無停電電源とすると復帰時間が短縮できる。

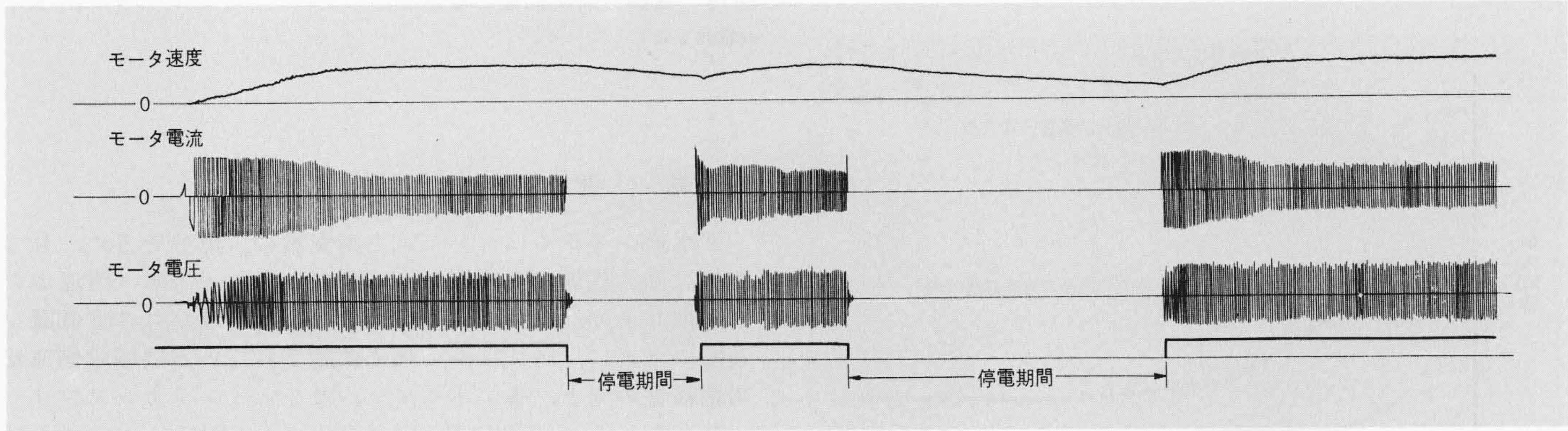


図12 瞬時、停電時のアシンクロ形サイリスタモータの動作オシログラム 停電時間が短ければ復帰時間も小さい。

ることによりシステム全体の運転の信頼度を高めるよう図っている。特に周波数制御方式のアシンクロ形、及びシンクロ形サイリスタモータにおいては、電流制御によるソフトスタートができるので、回転数の急激はじょう乱がなく、円滑に元の速度に回復ができる。

図12は、アシンクロ形サイリスタモータの瞬時停電時の動作を示すオシログラムである。

6.2 力率改善、及び高調波対策

サイリスタ変換装置を用いたパワーエレクトロニクスによる電動機制御装置の適用に当たっては、電源系統からながめた総合力率の低下に対する無効電力の供給、変換装置から発生する高調波に基づく電源系統中の他の機器に対するひずみ波形の影響及びその対策、並びに通信線への誘導障害とその対策を十分検討する必要がある。

(1) 力率改善

電源系統からながめた総合力率は、電動機速度により変化する。電動機励磁電流は、速度にかかわらずほぼ一定である

から、速度が低いときは力率の低下が著しい。このため、速度に応じた力率改善が必要であるが、図13にシンクロ形サイリスタモータの力率改善例を示すように、ポンプ駆動の場合軸動力は回転数の3乗に比例するので、低速度範囲における電動機励磁電流を補償する一定の進相コンデンサを接続することにより実用上十分な力率改善を行なうことができる。

(2) 高調波対策

サイリスタ装置から発生する高調波対策には、複数台並列運転の場合、電源変圧器の接続を変えて電源系統からながめた相数を増加させること、及び交流フィルタの適用が有効である。複数台並列運転時の相数の増加は、電源変圧器の接続をΔ/Δ、Δ/Yの組合せとし、電源系統からながめた相数を増したとき、第n次高調波電流Inは次の(1)式で表わせる。

$$I_n = \frac{1}{n} \cdot I_1 \dots\dots\dots (1)$$

$$n = 6m \pm 1 \quad (\Delta/\Delta \text{ 接続 だけの 場合})$$

$$n = 12m \pm 1 \quad (\Delta/\Delta, \Delta/Y \text{ 接続 の 組合せ の 場合})$$

(但し、I1は基本波電流、mは1, 2, 3, ……、nは次数)

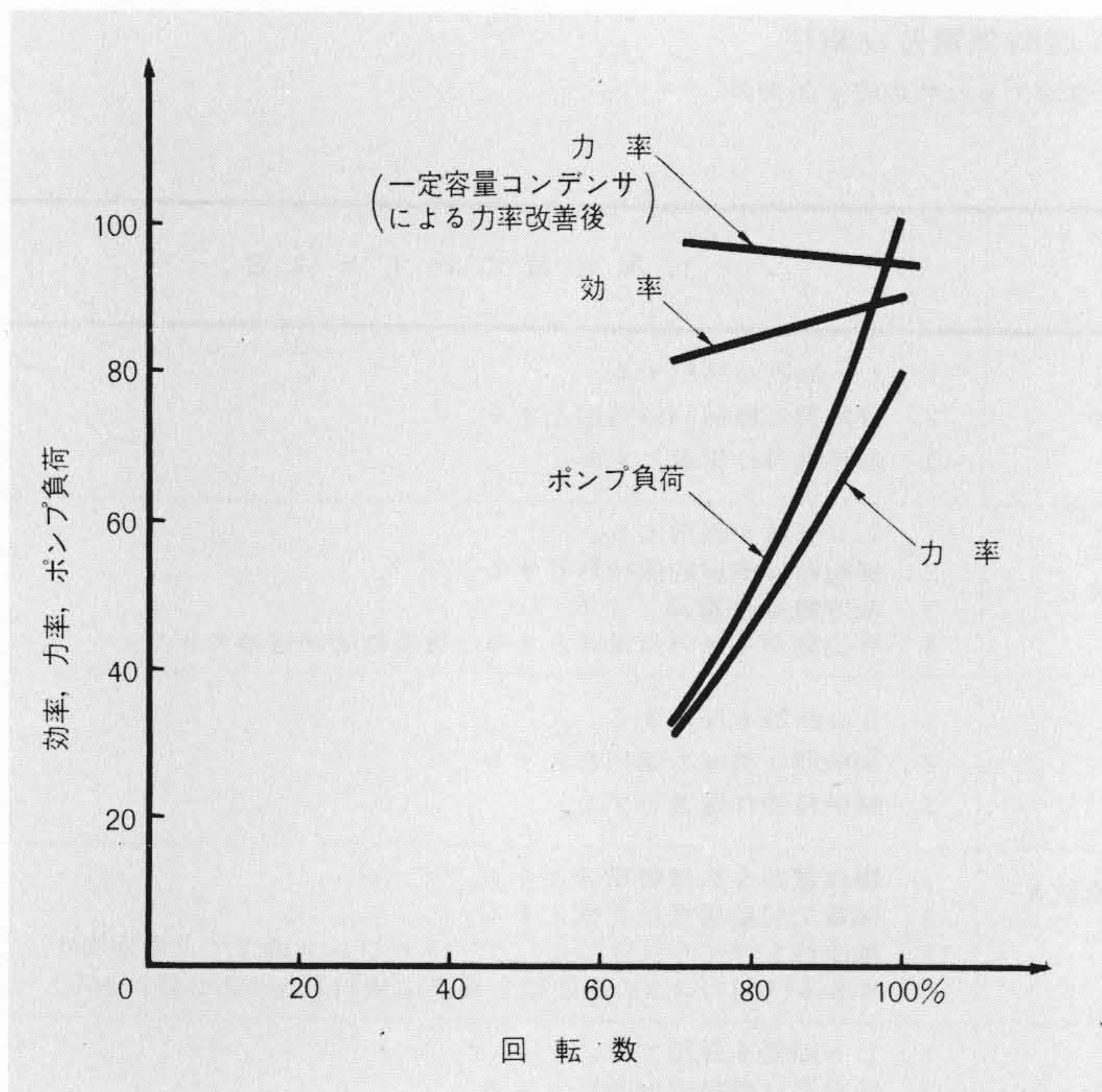


図13 ポンプ用シンクロ形サイリスタモータの力率改善
一定容量コンデンサを接続して力率改善を図った例を示す。

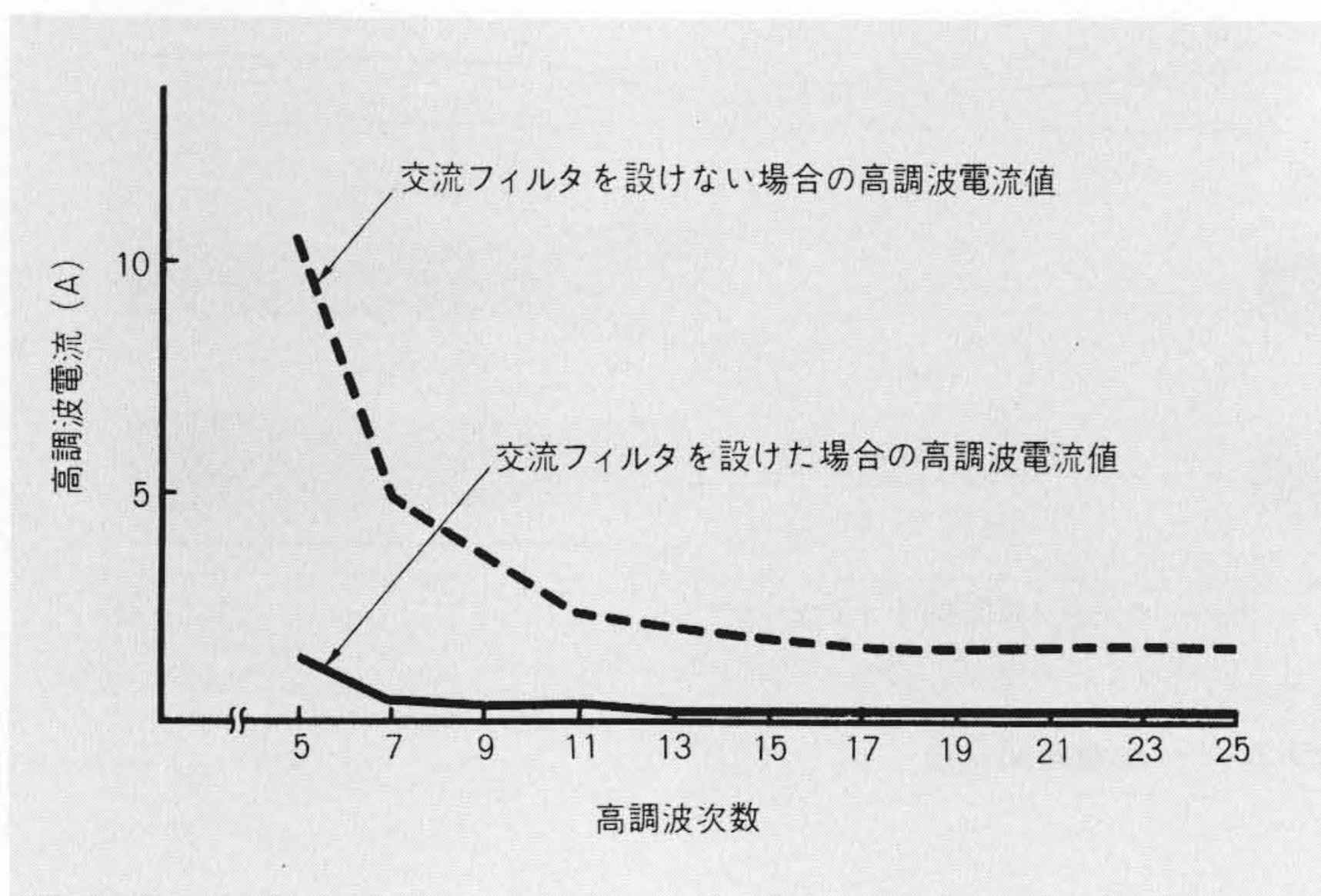


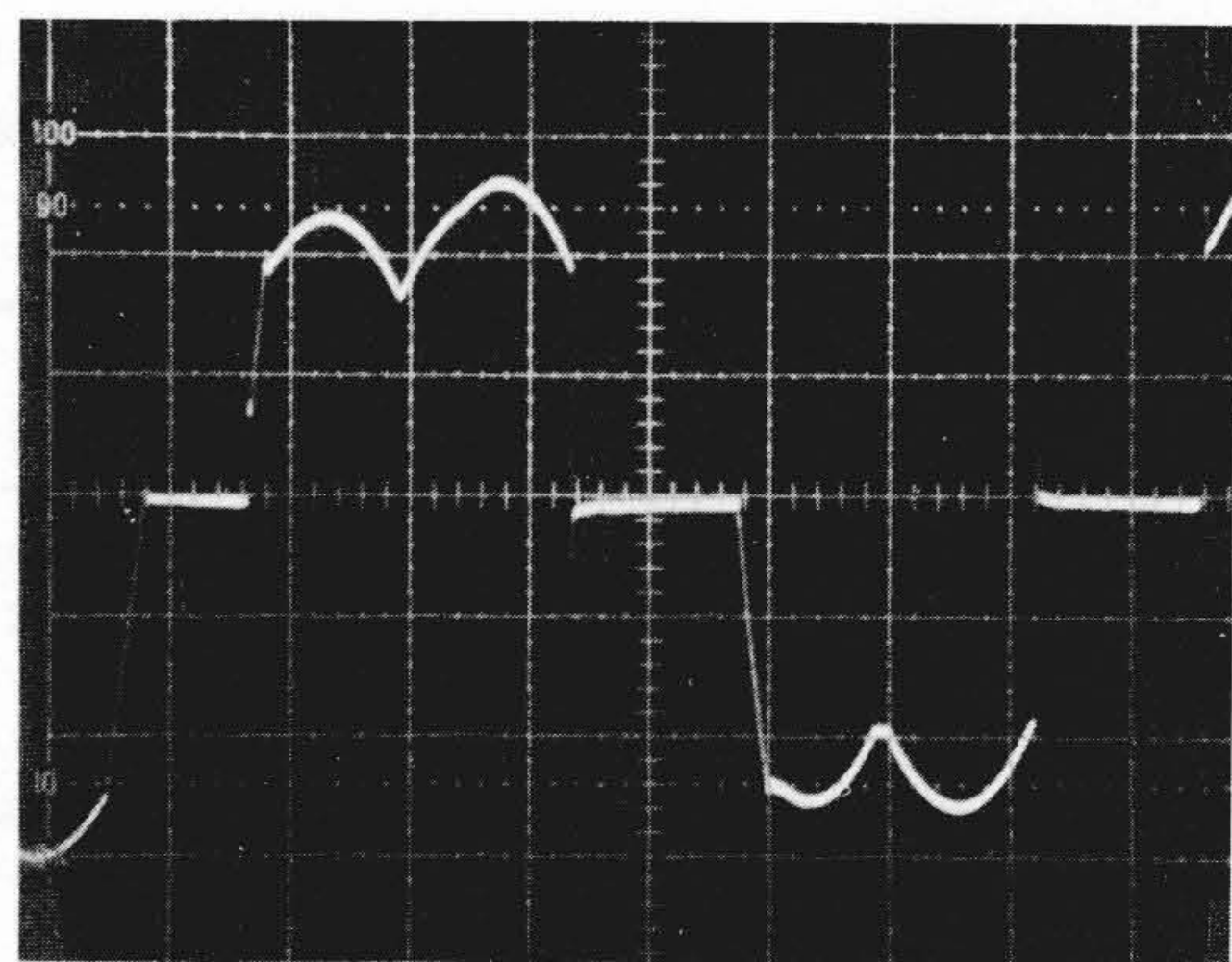
図14 交流フィルタによる高調波対策の実施例 高次高調波を特に小さくした。

Δ/Δ 、 Δ/Y の組合せを用いることによって、低次の高調波電流の発生が抑えられ大容量機にも有効である。小容量機に対してはこの方式でも十分であるが、大容量機、電源及び周囲の条件が厳しい場合には、移相変圧器を併用して組合せ相数を36、42、48のように増加すること、あるいは専用の交流フィルタを設置する必要がある。

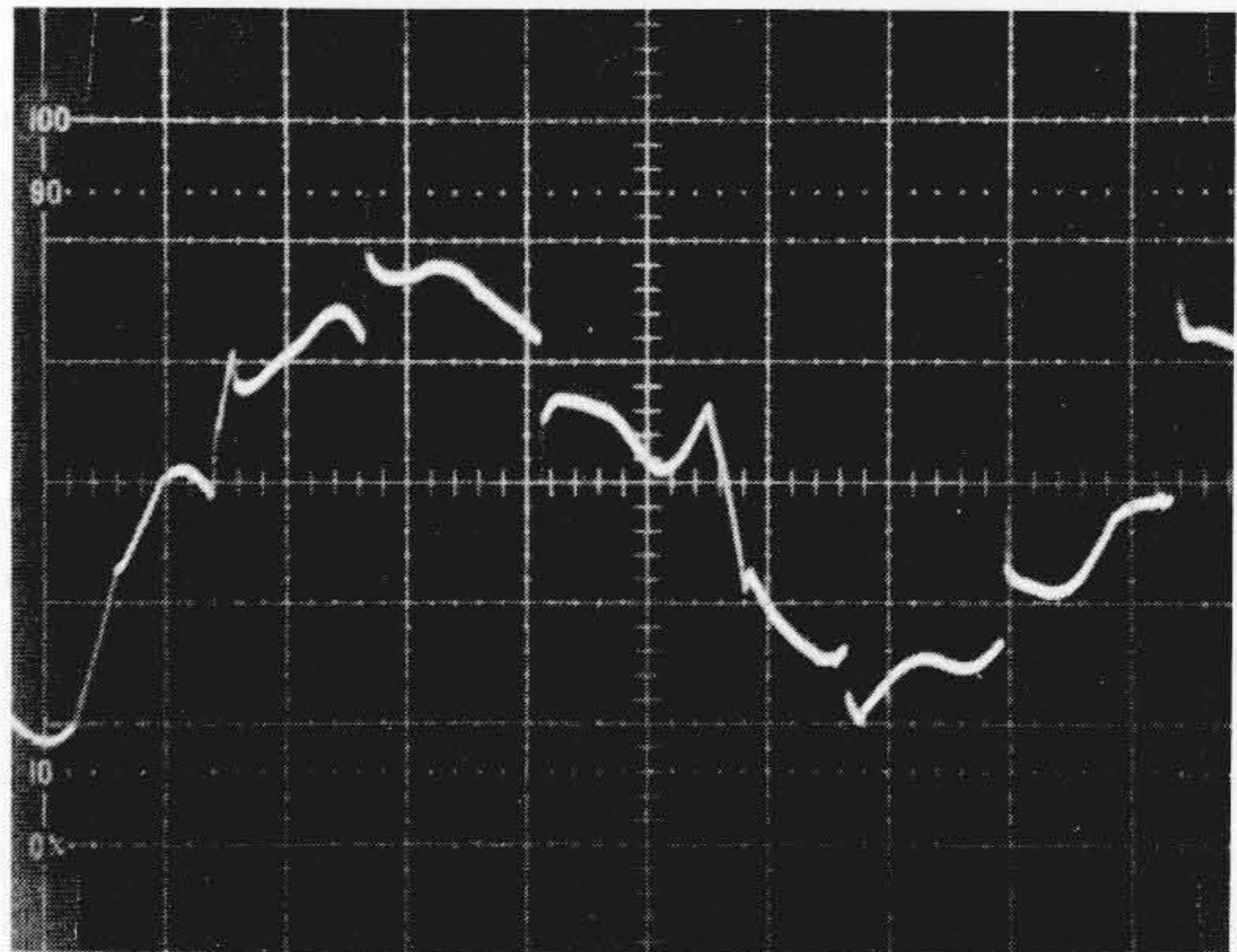
交流フィルタにおいては電源系統を含め全体の条件を考慮のうえ、複雑な計算と慎重な検討を必要とする。

日立製作所は高調波分布計算用プログラムを開発し、最適フィルタの計算を実施している。

図14は交流フィルタと進相コンデンサの併用で高調波対策を行なった例において、各次数ごとの高調波電流の実測例を示すもので満足すべき結果が得られている。図15に高調波対策前と後の電流波形のオシログラム例を示す。



(a)高調波対策前



(b)高調波対策後

図15 高調波対策前後の電流波形の比較 交流フィルタにより高調波電流を吸収している。

7 結 言

下水道システムにおいて電力消費量の大部分を占め、且つ機械設備の代表である曝気用ブロウと汚水・雨水・汚泥ポンプを取りあげ、システム全体の確実、容易及びコスト低廉な運転のために、時代に沿い強く要請されている機械設備運転の信頼性の向上、省エネルギー、及びメンテナンスフリーの面から、その制御方式と駆動装置のあり方について考察した。

代表的駆動装置である電動機については、サイリスタ及び集積回路の進歩によってパワーエレクトロニクスによる速度制御が広く採用されるようになった。サイリスタモータ、及びサイリスタコントローラは、瞬時停電対策、力率補償、高調波対策などの安全性制御のもと運転信頼性の向上、省エネルギー、及びメンテナンスフリーを実現し、特に下水道システムに適したものである。

終りに当たり、終始、御指導をいただいた大阪市下水道局の関係各位に対し厚く御礼を申しあげる次第である。

参考文献

- (1) 小沢、加藤：「下水道における電力応用総論」 2-77 昭49 電気四学会連合大会予稿
- (2) 神津、村上ほか「上下水道ポンプと速度制御システム」 日立評論 54, 930 (昭47-10)
- (3) 野田、広、堀：「誘導電動機のブラシレスセルビウス制御」 日立評論 55, 640 (昭48-6)
- (4) 小西ほか：「産業用サイリスタモータ」 日立評論 55, 618 (昭48-6)
- (5) 梓沢ほか：「サイクロコンバータ方式サイリスタモータ」 日立評論 53, 752 (昭46-8)