

# 上下水道ポンプと速度制御システム

## Recent Pumps and Speed Control System

For over a decade Hitachi, Ltd. has been supplying speed control systems including such record products as Kraemer sets and Scherbius sets for pumps, for use in the water distribution system. Recently, in the speed control system emphasis has been placed on realization of brushless system in order to relieve operators of a tedious maintenance work. With this trend in mind, Hitachi, Ltd. has made its efforts to develop asynchronous and synchronous thyristor motors and brushless cascade Scherbius systems. The results of the efforts are discussed in this article.

神津修二\* *Shuji Kôzu*  
 村上啓一\* *Keiichi Murakami*  
 小西 務\*\* *Tsutomu Konishi*  
 藪 博昭\*\* *Hiroaki Yabu*  
 山本芳正\*\*\* *Yoshimasa Yamamoto*

### 1 緒 言

最近、上下水道における処理水量の増大ならびに系統の広域化に伴う長距離送水の必要性から、ポンプの大形化が進んでいるとともに、ポンプ場の合理的計画と運営の高度化が追求されている。

ポンプの速度制御は上下水道システムにおいて、システム運用上の経済的ウエイトの大きさから、きわめて重要な地位を占めている。このことは過去10年の歴史的経過において数々の記録的速度制御方式がポンプに適用され、現在では、小容量の汎用ポンプにまで一般的に採用されるようになっていくことからみても、首肯されることである。

日立製作所は昭和39年東京都水道局へ、当時の記録的製品である6,200kWクレーマセット3台を納入し、わが国における水道ポンプ速度制御方式の一エポックを画して以来、セルビウスセットを中心に多数の実績を重ねてきた。これらを可能にした技術的背景は、いうまでもなくサイリスタを中心としたパワーエレクトロニクスの進歩にあった。

最近になり、過去10年近くにわたるセルビウス制御を中心とした速度制御方式も、新しい技術的転換をしようとしている。すなわち、メンテナンスフリーと高性能化を求めて、ブラシレス化の要求が高まり、サイリスタモータを中心としたブラシレス・モータがその開発期を脱し、実用期にはいろいろとしている。本論文では、最近のポンプの動向を述べ、続いて、アシンクロナス・サイリスタモータおよびシンクロナス・サイリスタモータについての実績と開発状況を紹介する。なお、上下水道の全面的普及に伴い、汎用ポンプにも速度制御が一般化しつつあるので、その状況にも触れる。

### 2 最近のポンプの動向

#### 2.1 大形化するポンプ

上水道、工業用における用水需要量の増大や長距離輸送に伴い、原動機の出力は年々増大し、1台当たり1,000kWを越える大形ポンプが続々と設置され、6,000kWを越えるポンプも出現するに至っている。

下水道においても処理量の増大や広域化により、ポンプが大形化し、ポンプ口径2,000mm以上の大容量ポンプが多数設置されており、3,000~4,000mm級のポンプの時代となってきた。4,000mm級のポンプでは、ケーシングをコンクリート巻きにするなど、機械プラス現代土木の総合技術が必要となっ

ている。

ポンプの大形化に伴い、水車で一般化されたモデルによる試験を採用し、いたずらに試験設備を大きくすることなく、測定精度の高い中形ポンプで各種の試験を行ない、これにより大形実機の性能を判定する方法がとられる。このようなモデル試験方案は、近くJISに制定される運びとなった。

#### 2.2 長距離送水

水源地が遠隔であることから、また処理排水の地理的条件から、ポンプの送水距離は年々延長されるに至っている。

長距離送水の場合は、経済的な送水管径が慎重に選定される。すなわち、施設費の節減を図り管径を小さくすると摩擦損失が増加して運転費が増大する。施設費と、送水量、運転時間による運転動力費を試算して送水管径を決定しなければならない。

停電などによる急激な送水停止に伴う過渡現象（ウォータハンマ）のため送水管破損の危険性を有する場合がある。その対策は管径、管種、プロフィールなどにより決定されるが、複雑な長距離送水の場合はコンピュータによる解析も必要となり、その結果、ワンウェイサージタンクが5基併設された場合もある。

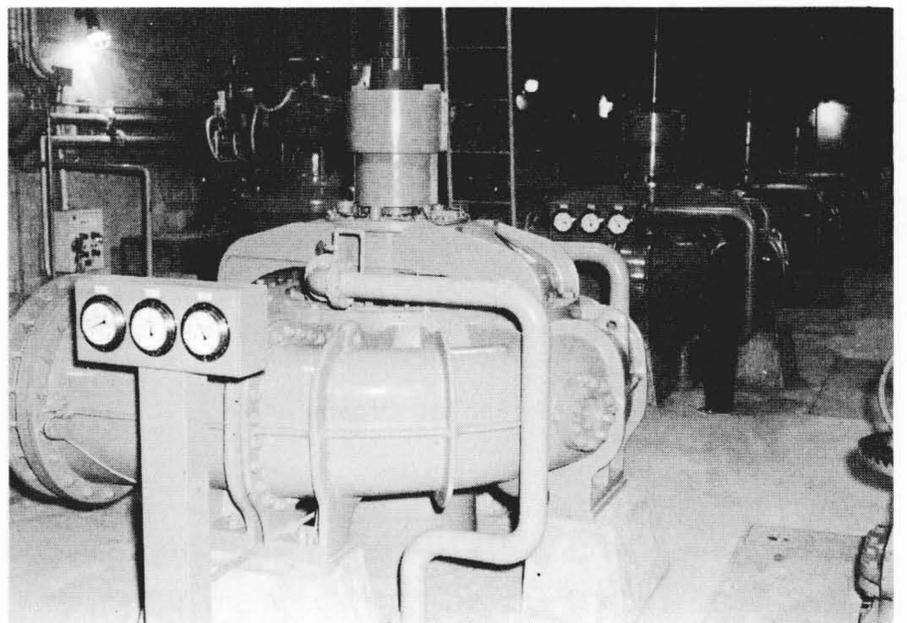


図1 東京都水道局大蔵給水場納めポンプ群 1,200kW巻線形誘導電動機駆動ポンプにサイリスタセルビウス制御を施し吐出し圧一定制御を行っている。

Fig. 1 Pump Station Controlled by Scherbius Control System

\* 日立製作所機電事業本部 \*\* 日立製作所大みか工場 \*\*\* 日立製作所習志野工場

### 2.3 設置面積の縮小

浄水場や処理場の敷地を縮小することは、わが国の水道事業の促進に大いに役立つことであろう。ポンプ場も立形ポンプや水中ポンプの採用により、設置面積を縮小することができる。さらにポンプ吸水その縮小が全体面積を小さくし経済的な土木構造をもたらすことから、モデルによる吸水そのの研究が盛んである。

### 2.4 制御の高度化

すでに述べられたところであるが、制御の高度化は最近の顕著な特長といえる。すなわち、一人制御、遠隔制御はすでに一般化され、運転保守員の数は著しく低減されている。さらに大形ポンプが設置されるに従って運転動力費の低減、合理的な運転を目的とし自動制御を採用する設備が急増している。変化する計画水量に応じてポンプ吐出し量を制御し、末端圧一定、水位一定の自動制御を行なうのに、古くは台数制御や弁制御を採用したこともあったが、近時は速度制御が多くなった。

## 3 ポンプの速度制御方式

### 3.1 最近の動向

交流電動機、特に誘導電動機は安価で構造が簡単であるが、速度制御をしにくいいため、セルビウス方式やクレーマ方式など巧妙な工夫が図られている。特に1960年代にはいつてからのサイリスタ応用技術の急速な発展にささえられて、サイリスタ・セルビウス方式が急速に普及を見せた。

最近では、サイリスタによる交流機速度制御の分野は、さらに拡大しつつある。このような傾向はサイリスタ変換器による交流機速度制御が行ないやすくなったことに加え、コミュテータレスおよびブラシレスという保守上の要求が強くなってきたためである。

また従来、比較的小容量のポンプでは、流体継手など機械的制御装置や二次抵抗制御あるいは整流子電動機などが採用されていたが、経済性、制御性能の向上の観点から効率のよい連続的な速度制御が用いられるようになってきている。さらに、最近省力化、無人化の観点から無保守化の要求が高まり、ついにブラシレス方式が実用化されるようになってきた<sup>(1)~(3)</sup>。

### 3.2 ブラシレス・モータの種類と概要

ブラシレス・モータの速度制御は表1に示すように交流機で実現できる。これらの各方式のうち、一次電圧制御方式は比較的小容量の場合に用いられる。インバータ方式は、特にアメリカで揃速(せんそく)や多数台制御を要する一般産業用に実用されていて、電源容量で1~1,000kVA、速度調整範囲で1対40に及ぶものがみられるが、一般に高価でポンプ用としての例は見当たらない<sup>(5)</sup>。

カスケード・セルビウス方式は同軸上に設置された3台の誘導電動機を縦続接続してブラシレス化を実現したものであり、比較的低速度運転、1対2程度の速度調整に適するが、力率が悪くなりやすく、速度調整範囲を広くしようとするとき変換器容量が増大し、比較的成本高になりやすい。この方式はポンプ用として1,650kWの製品例がある。その他の方式について以下に説明する。

### 3.3 アシンクロナス・サイリスタモータ

#### 3.3.1 原理および特性

誘導電動機のトルク(T)ーすべり(S)特性式は、よく知られているように次式で表わされる<sup>(6)</sup>。

$$T = \frac{3P}{4 \times 9.8 \pi} \cdot \frac{r_2'}{\{(S r_1 + r_2')^2 + S^2(x_1 + x_2')^2\}} \cdot (Sf) \cdot \left(\frac{V_1}{f}\right)^2 \dots (1)$$

表1 ブラシレス・モータの速度制御方式 サイリスタ変換器と交流機の組み合わせによりブラシレスにできる各種方式を示したものである。

Table 1 Speed Control Methods of Brushless Motor

電動機	制御方式
誘導電動機	カスケード・セルビウス方式
	一次電圧制御方式
	インバータ方式
	サイクロコンバータ方式
同期電動機	AC方式(サイクロコンバータ方式)
	DC方式

ここに、 $P$ :極数、 $r_1, x_1$ :一次一相の抵抗、漏えいリアクタンス、 $r_2', x_2'$ :二次一相の抵抗、漏えいリアクタンス(一次換算値)、 $f$ :供給電圧の周波数、 $V_1$ :一次一相の端子電圧  
上式において、 $V_1/f$ 一定とし、 $f$ をパラメータとしたときの $S$ に対する $T$ の関係をグラフにすると図2の実線のようになる。

いま、ポンプのトルクー速度特性が図2の点線のようにであるとすれば、それと電動機特性の交点(○印)で運転されることになる。すなわち、 $V_1/f$ を一定に保ち、 $f$ を変化させると、それに従ってポンプの速度が制御できる。

#### 3.3.2 制御装置の構成および動作

前節の原理で述べたように、かご形誘導電動機の一次電圧および周波数を変化させるため、可変周波の電源が必要となる。商用周波電源から周波数の異なる交流を得るため、交流から交流を直接変換するサイクロコンバータが用いられる。これら主回路および制御装置の構成は図3に示すとおりである。自動パルス移相器はサイリスタ素子のゲート制御角を調整することにより、サイクロコンバータの出力電圧を変化させる。この電圧の周波数は、電圧ー周波数変換器の出力により決められる。

#### 3.3.3 特性

30kWの誘導電動機を用いて、速度帰還制御なしの場合の静特性を示すと図4のようになる。この結果、速度制御精度は

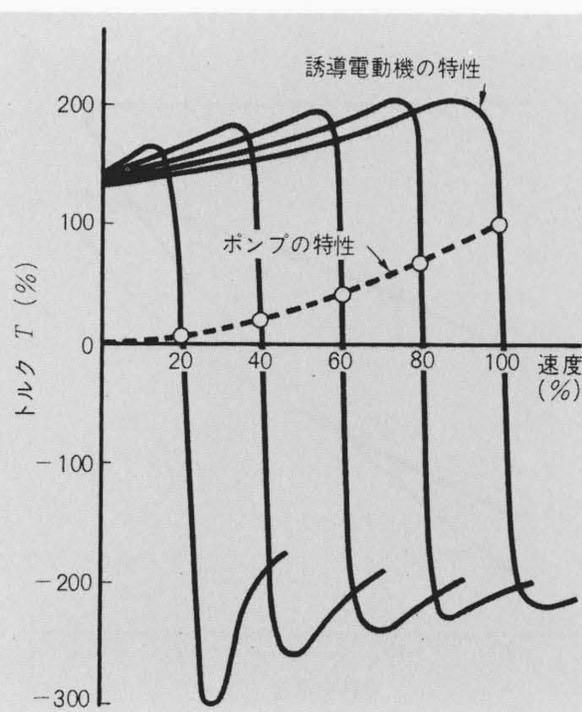


図2 トルクー速度特性 周波数をパラメータとしたときのかご形誘導電動機のトルクー速度特性を示す。

Fig. 2 Torque - Speed Characteristics

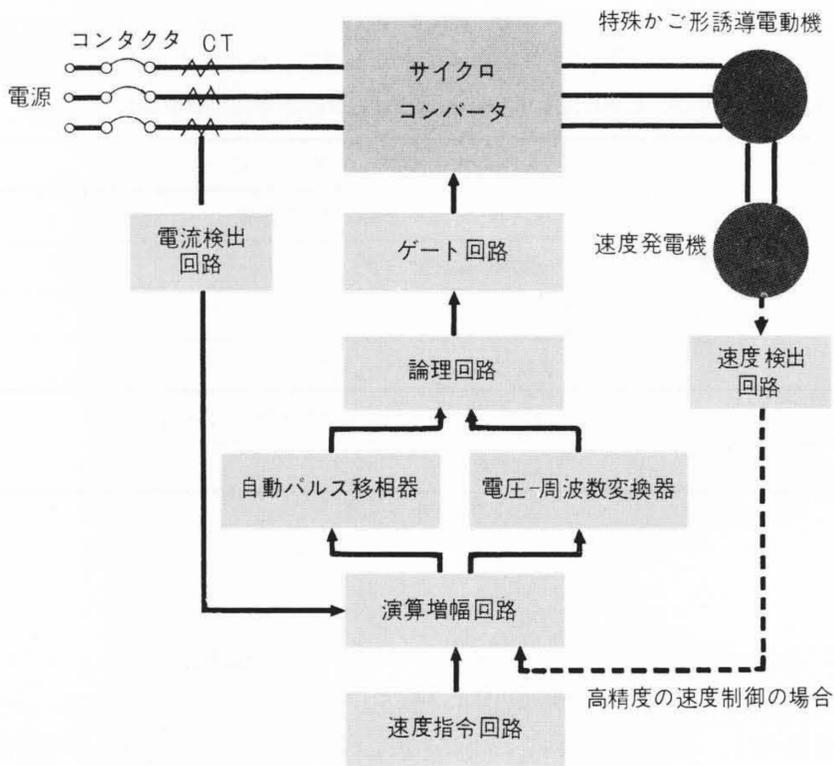


図3 アシクロナス・サイリスタモータの構成 アシクロナス・サイリスタモータの主回路および制御回路のブロック図を示す。

Fig. 3 Block Diagram of Asynchronous Thyristor Motor

約2%程度である。次に、正逆運転時の過渡特性を示すと図5のようになる。動作は正常かつ安定である。

3.3.4 特徴および応用

- (1) 電動機は特殊かご形誘導電動機を基調としているのでブラシレスで保守点検を要せず堅ろうである。
- (2) サイクロコンバータ方式を採用しているため、整流が安定しており信頼度が高い。
- (3) 電流制御系をマイナーループにもつので、外部指令の急激な速度指令の変化に対しても円滑に加減速し、広い範囲の速度制御ができる。
- (4) 高電圧、大容量機の製作ができる。
- (5) 電動機軸に回転角検出器や速度発電機（高精度の速度制御が要求されない場合）が接続されないため電動機まわりが簡単である。

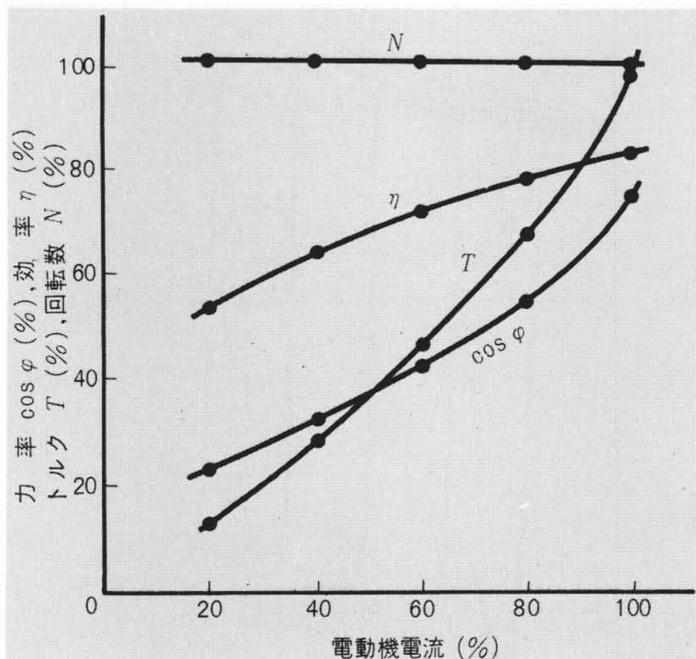


図4 アシクロナス・サイリスタモータの特性 アシクロナス・サイリスタモータの電動機電流に対する特性の一例を示す。

Fig. 4 An Example of Static Characteristics of Asynchronous Thyristor Motor

- (6) 瞬時停電後の復電時にも、転流失敗に神経を使わず、自動復帰ができる。
  - (7) 電動機電圧の周波数は、普通電源周波数の1/3以下である。ただし、この値は電流ビート、力率、効率などの条件が許容される場合には1/2以下まで大きくできる。
  - (8) 配水ポンプ用などで制御上の故障が発生した場合およびバックアップ運転が要求される場合には、別制御系に切り替え、支障なく送水できる方式にすることができる。
- 以上の特徴を利用して、本報の上下水道ポンプ用のほか、トンネルファン、クレーンなどの一般産業用やテーブル・ローラなど製鉄用にも応用できる。

3.4 シンクロナス・サイリスタモータ

アシクロナス・サイリスタモータは従来の誘導電動機のスリップリングレスをねらったものであるが、シンクロナス・サイリスタモータは直流機のコンミュテータレスをねらったものといえる。このため、一種の同期電動機を用い、ブラシとコンミュテータの働きをサイリスタで行ないブラシレスを実現している。この方法には、交流方式と直流方式の二つがある。

3.4.1 交流方式

(1) 構成および動作原理

交流方式は前節で述べたサイクロコンバータにより商用電源から電圧と周波数の異なる交流電源を作り電動機に供給するもので、図6のように構成される。電動機は回転界磁形の同期機で、図7に示すような回転子構造をもち、励磁巻線を固定子側に円筒状に巻くことにより、ブラシレスとしている。

電動機の三相の固定子巻線の二相に、回転子の回転位置に応じて電流が流れるよう、サイクロコンバータのサイリスタ素子が点弧される。この場合、電源各相R-S-Tの素子間の転流、たとえばRUP-SUP-TUPの転流は電源周波数をベースにして行なわれ（電源転流）、出力電圧が位相制御により調整される。また、電動機各相U-V-Wの素子群間の転流、たとえばRUP-RVPの転流は、回転位置検出器（すなわち電動機電圧の周波数）に応じて行なわれる（負荷転流）、なお両者が同時に行なわれる場合がある（相互転流）。

演算制御回路およびゲート制御回路は集積回路（IC）演算増幅器、自動パルス移相器、論理ICなどから成り、電流制御系をマイナーループにもつ速度制御系となっている。

(2) 特性

170kWのサイリスタモータを用いて速度制御した場合の

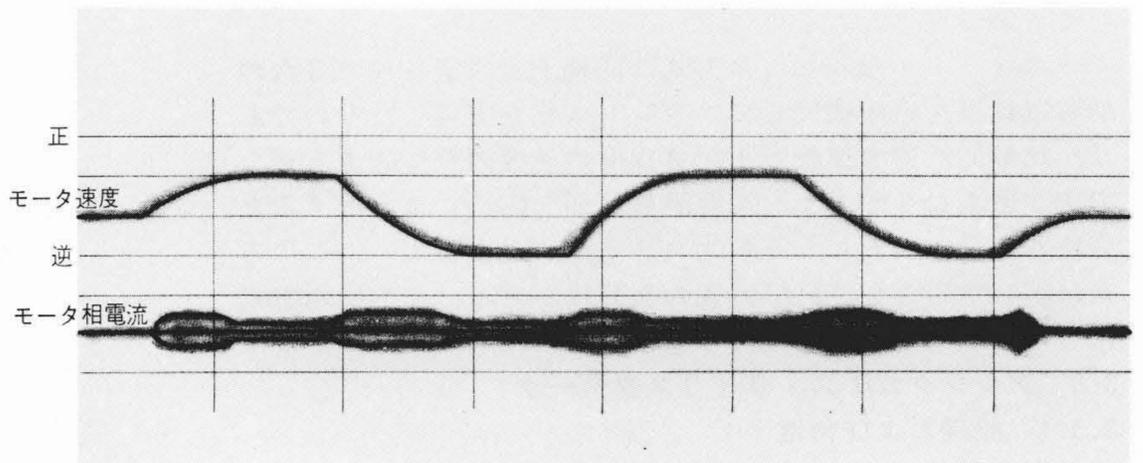


図5 アシクロナス・サイリスタモータの正逆運転特性 正逆運転時の電動機速度の応答のオシログラムである。

Fig. 5 Speed Response of Asynchronous Thyristor Motor

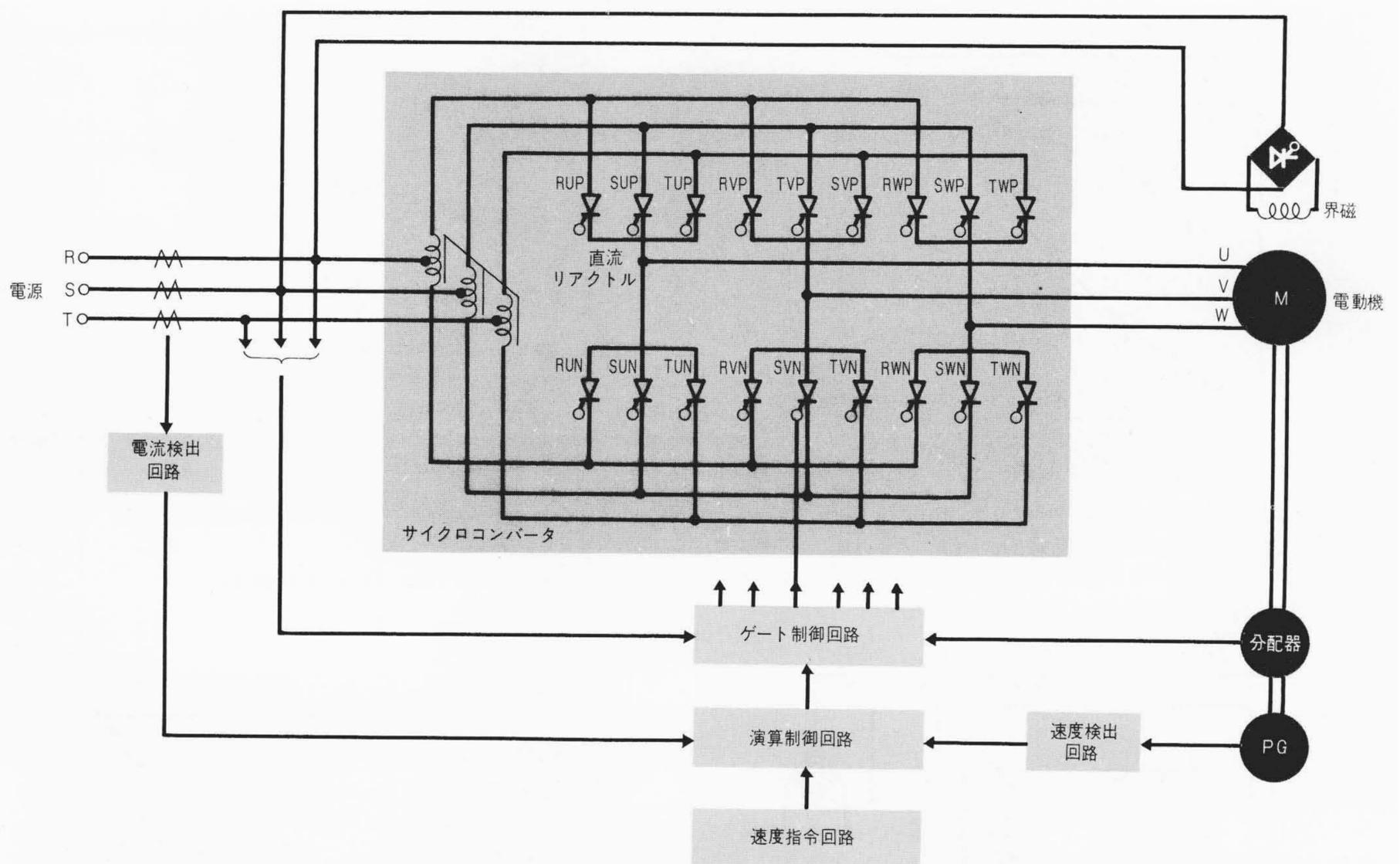


図6 交流方式シンクロナス・サイリスタモータの構成 サイクロコンバータを用いたサイリスタモータの主回路および制御回路のブロック図を示す。

Fig. 6 Block Diagram of AC Type Thyristor Motor

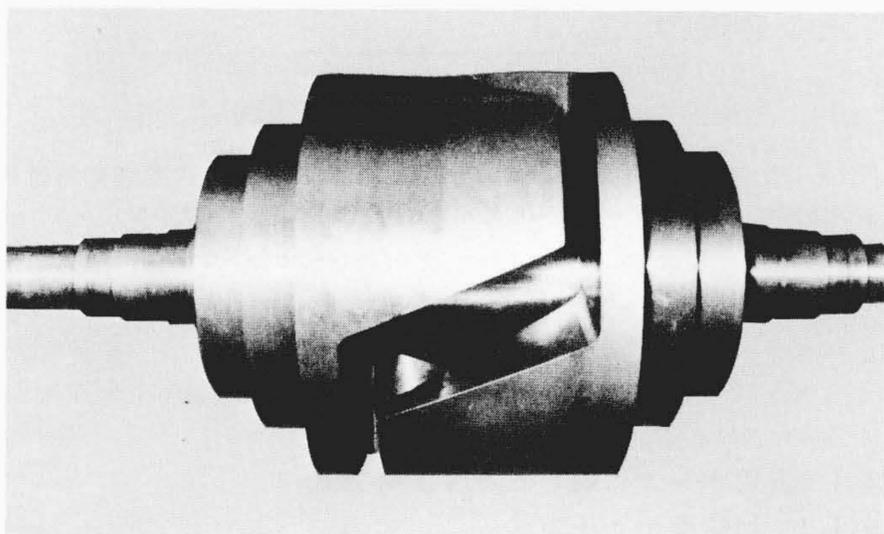


図7 シンクロナス・サイリスタモータ回転子 ルンデル形の回転子の構造を示す写真である。

Fig. 7 A Rotor of Thyristor Motor

静特性例は図8に示すとおりで、速度制御精度は約0.5%程度である。加速運転時の過渡特性は図9に示すとおりで、動作は正常である。

### 3.4.2 直流方式

#### (1) 構成および動作原理

直流方式は、図10に示すようにサイリスタ順変換器により商用電源から可変電圧の直流を得て、この直流からサイリスタ逆変換器を用いて電動機速度に応じた周波数をもつ交流電圧を作り電動機に供給している。順変換器のゲート位相制御により直流電圧を変化させると、それに応じた逆起電力を発生する速度で電動機が回転する。この逆起電力

の極性を検出し、その信号により逆変換器が点弧される。この場合、逆変換器の転流は電動機の逆起電力によりなされるが、比較的低速時には転流ができない。そこで、起動時および低速時には、電圧-周波数変換器で発生されるパルスを逆変換器に供給するとともに、電源のサイクルごとに順変換器のゲート角 $\gamma$ を最小値にし、電流を断続させることにより順変換器の転流を行なっている。

#### (2) 特性

30kWのサイリスタモータを用いて速度制御した場合の静特性は図11に示すとおりで、速度制御精度は約0.5%程度である。

### 3.4.3 特徴および応用

- (1) ルンデル形磁極の回転子の使用によりブラシまわりの保守から開放される。
- (2) 広範囲の速度制御ができる。
- (3) 電動機の最大速度は電源電圧に関係なく高速(5,000rpm程度)にできる。
- (4) 瞬時停電時、復電とともに元の運転状態に復帰できる。
- (5) 可逆運転、回生制動が容易にできる。

以上の特徴を利用して、上下水道ポンプ用のほか、トンネル・ブロワ、攪拌(かくはん)機などの一般産業用や圧延機用などにも応用できる。

## 4 汎用ポンプの上下水道への応用

一般に、口径300mm以下、モートル出力250kW以下のポンプは、汎用ポンプと呼ばれ、機種標準化が確立されている。簡易水道をはじめとして、中小都市の上下水道用のポンプは、この汎用ポンプの範囲にあり、従来より多数の実績をも

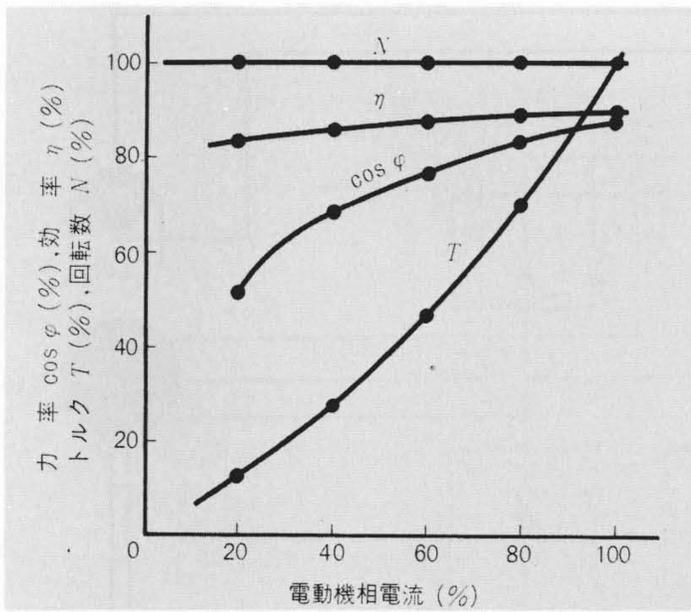


図8 交流方式シンクロナス・サイリスタモータの速度制御特性例 交流方式サイリスタモータの電動機電流に対する特性の一例を示す。

Fig. 8 An Example of Static Characteristics of AC Type Thyristor Motor

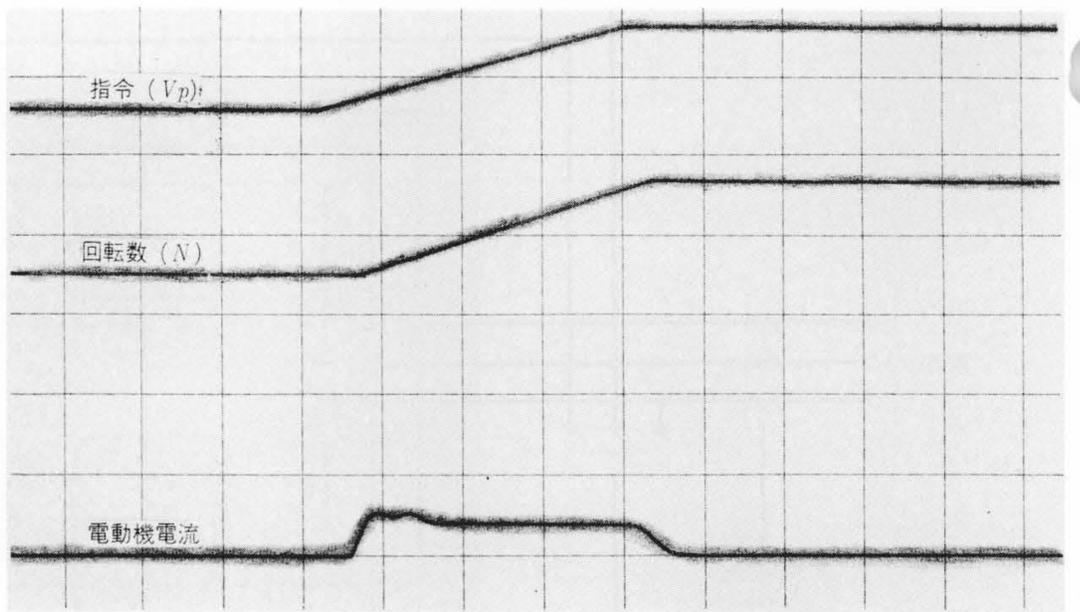


図9 交流方式シンクロナス・サイリスタモータの加速運転特性 加速運転時の電動機速度の応答のオシログラムである。

Fig. 9 Speed Response of AC Type Thyristor Motor

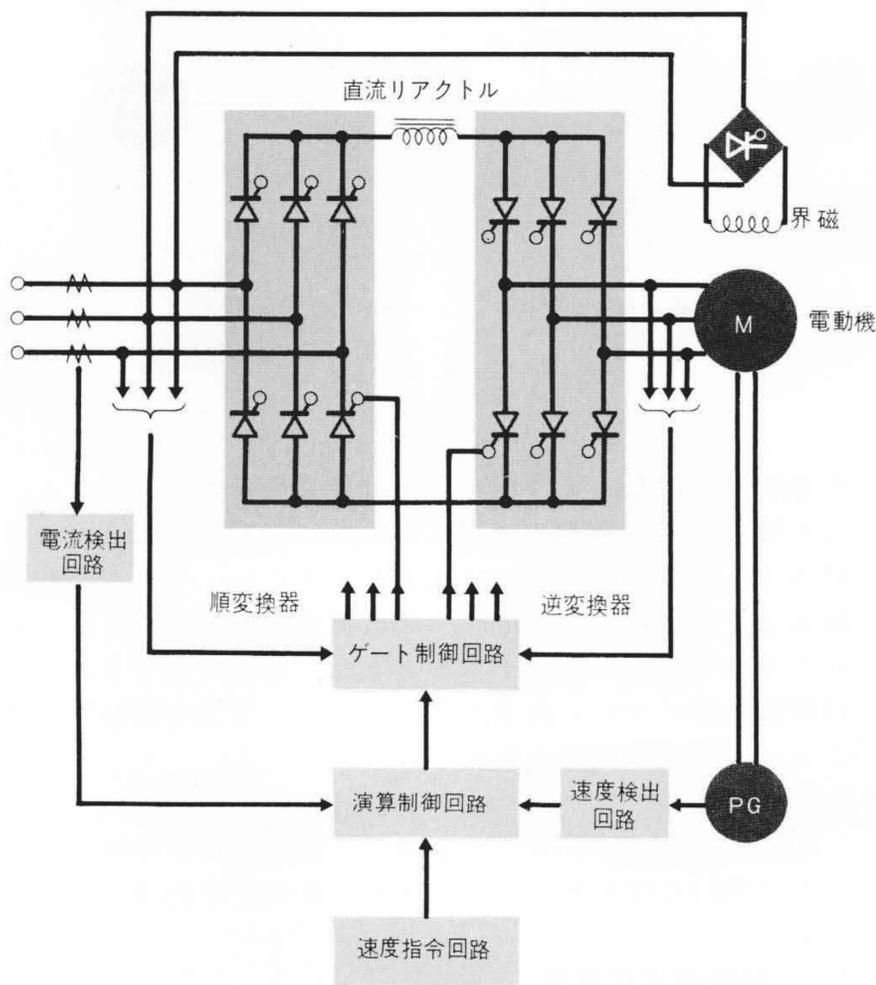


図10 直流方式シンクロナス・サイリスタモータの構成 コンバータをインバータを用いたサイリスタモータの主回路および制御回路のブロック図を示す。

Fig. 10 The Block Diagram of DC Type Thyristor Motor

っている。

近年、水道設備の近代化の傾向は、これら汎用ポンプを使用する規模のものにまで、加速的に波及しつつあり、送水方式は、速度制御による直送方式へと移行している。

汎用ポンプを駆動するモートルは、低圧モートルが大半で、制御設備も低圧に見合った内容のものが必要であり、汎用ポンプに適した速度制御方式を確立してきた。

ポンプの速度制御を行なう目的は、(1) 需要末端までの直送方式をとることにより、高架水そうや配水池の建設費をなくして、全体の設備費を安くする。(2) 需要の変化に合わせて供給を変化させ、運転動力費を安くするなど経済性を主体

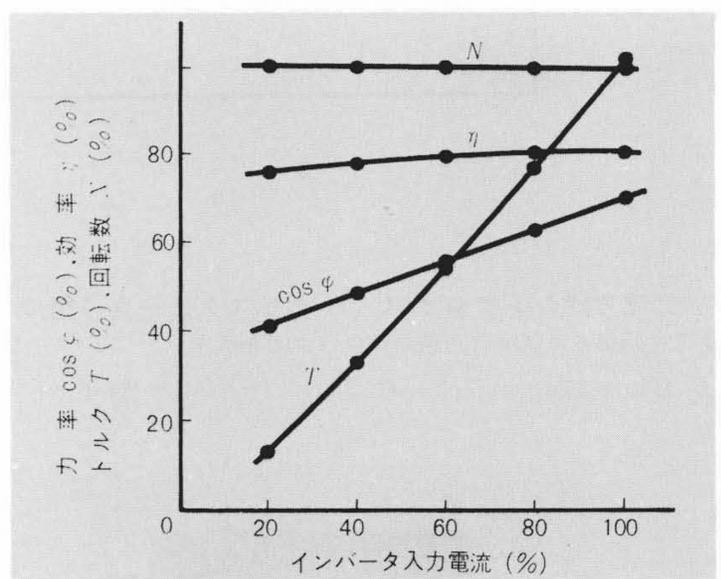


図11 直流方式シンクロナス・サイリスタモータの速度制御特性例 直流方式サイリスタモータの電動機電流に対する特性の一例を示す。

Fig. 11 An Example of Static Characteristics of DC Type Thyristor Motor

としているので、さらに保守を含めて、十分経済性を考慮したものであることが重要である。

#### 4.1 汎用ポンプに適した速度制御方式

##### 4.1.1 HCモートル方式

HCモートル方式は、イニシャルコストの低減に重点をおく場合に適しており、安価、保守不要、制御性の良さは、55 kW以下のポンプ設備となる市町村の水道用として最適のものである。HCモートル方式の場合は、実績のほとんどが吐出し圧一定制御のもので、制御系も簡素で低コストに徹しているのが一般である。

HCモートルの外観は図12に、電磁継手部の構造は図13に示すとおりである。モートル軸に取り付けられたドラムと、継手部の軸（出力軸）に取り付けられた磁極とがギャップをおいて、相對している。励磁コイルを直流電流で励磁するとモートルの回転によりドラムがこの磁束を切りドラム上をうず電流が発生する。このうず電流と磁束との電磁力により、磁極がドラムと同一方向に回る。磁束（励磁電流の大きさ）によって磁極（出力軸）の回転数が変わる。

このHCモートルの特徴をあげると、(1) モートル軸と継手部の軸（出力軸）との機械的な接触は

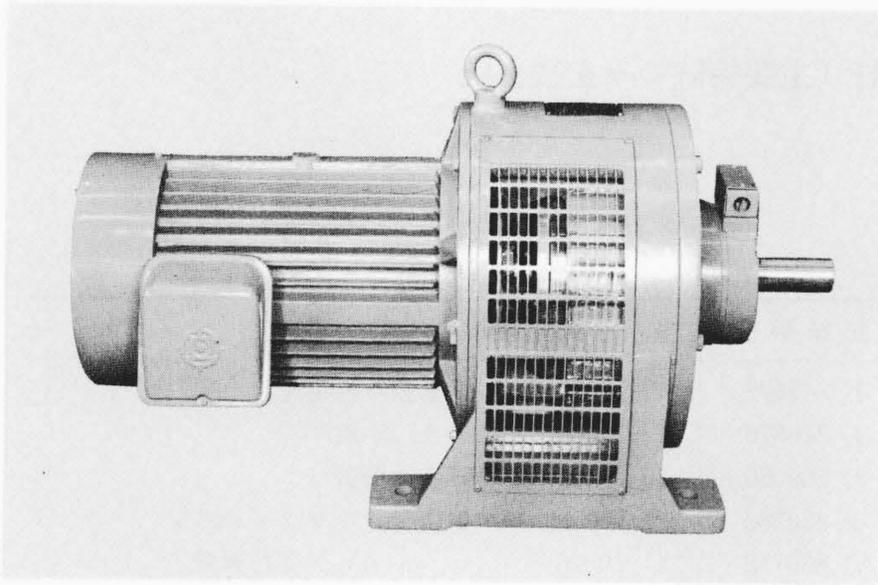
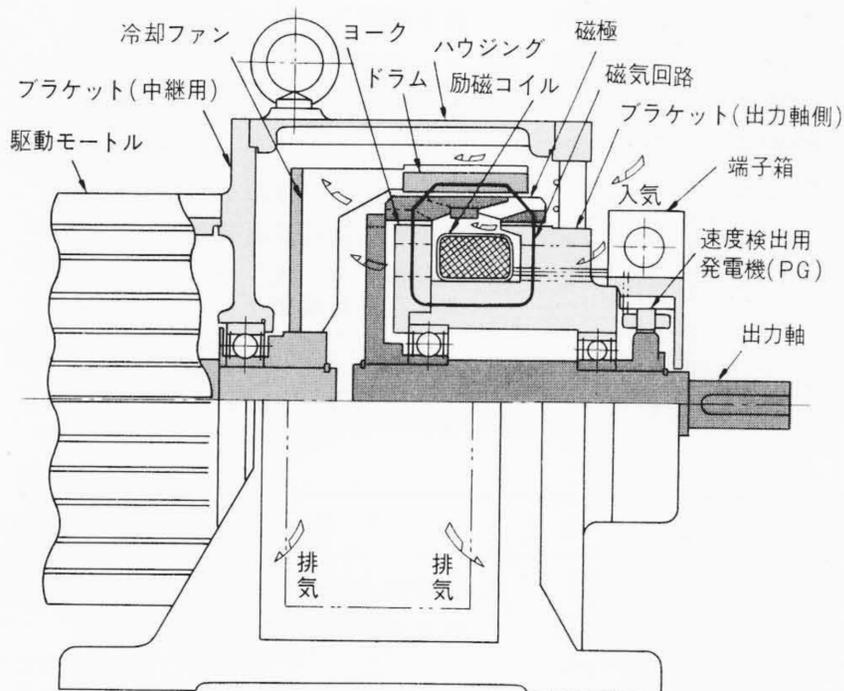


図12 HCモートル このモートルは電磁継手を内蔵したかご形モートルである。

Fig. 12 View of HC Motor



固定部分 回転部分(駆動側) 回転部分(出力側)

図13 電磁継手部の構造 モートル軸のトルクを電磁継手部の軸(出力軸)に伝える原理は励磁コイルにより磁化した磁極の磁束と、ドラムに流れる電流との電磁力により行なわれる。機械的接触部分が全くなく、メンテナンス・フリーのモートルである。

Fig. 13 Construction of HC Motor

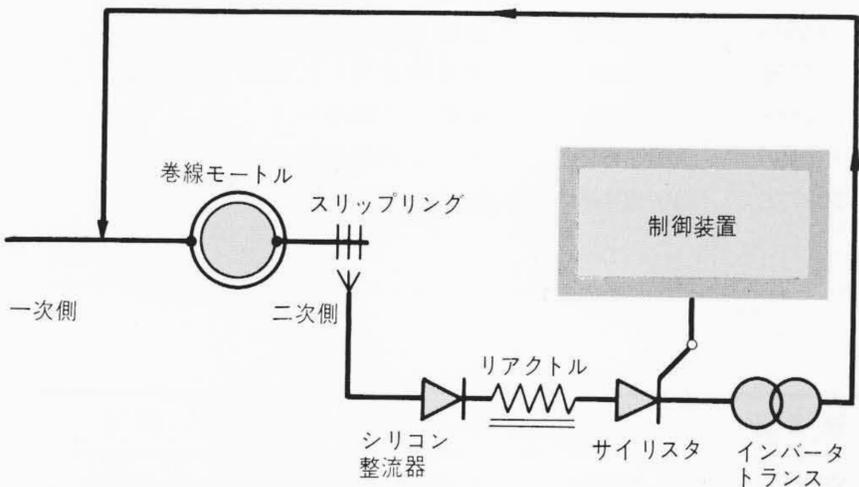


図14 静止セルビウス制御ブロック図 巻線モートルの二次側のすべり電力を一次側に返還する装置。

Fig. 14 Block Diagram of Scherbius Control

全くなく、トルクの伝達は電氣的に行なわれるため摩耗部分が全く存在しない(メンテナンス・フリーである)。

- (2) 速度制御は全く無段階に行なわれる。
- (3) ポンプの低減トルク特性に合わせて、ポンプ用HCモートルとなっているので、一般用HCモートルより回転数が高く、騒音が低い。
- (4) 非常に小さい信号電力で変速ができるので遠方制御が可能である。
- (5) 速度検出用発電機には三相高周波PGを使用しているので、低速、軽負荷においても高精度を発揮する。
- (6) 制御装置はIC、トランジスタ、サイリスタなどにより精度が高く小形である。

#### 4.1.2 低圧静止セルビウス方式

小規模の水道の場合は、イニシャルコスト重点の計画が大半であるが、37~132kWのポンプ設備では、ランニングコスト重点の計画が比較的多くなる。

これらの計画に対しては、特に低圧用に設計された静止セルビウス方式による、末端圧一定制御が多く採用されている。この方式は、巻線モートルを二次抵抗により変速していた方式の欠点(すべり電力が抵抗器の中で発熱消費される)を補い、すべり電力を一次側電源に返還することによって、運転効率を最高に維持するものである。機器は半導体素子によりまとめられているので、コンパクトで信頼性が高い。図14は静止セルビウス制御のブロック図である。

本方式は、大容量機に適用されてポンプ速度制御の従来の主役をなしてきたが、最近に至り、小容量機にまで適用されるようになってきた。大容量機は今やセルビウス方式から新しいサイリスタモータへ移行する機運にあるが、小容量機は、ブラシも小さく機構も簡単なのでモートル出力が37~132kW程度のものについては、本方式による制御が汎用ポンプの速度制御方式として現在では経済性もあり好適のものであると考えられるので、ここ当分の間は、本方式も採用されてゆくと思われる。

## 5 結 言

上下水道系の浄水場あるいは終末処理場は、大容量、大規模化され、取水、配水、中継ポンプ設備は、大形化、長距離化しており系統も複雑である。このような系統を少数の人員で能率よく運転制御し、完全な供給処理を行なうためには、信頼性が高く保守点検が不要なことが特に重要な条件となる。サイリスタモータによる速度制御は、この条件を満足する最適の方式であるため今後は各地でいっそう広く採用されるものと思う。

### 参考文献

- (1) 広, 岩城, 平輪: 誘導電動機の二次励磁制御, 日立評論 47, 1841 (昭40-11)
- (2) 梓沢ほか3名: 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)
- (3) 川上ほか4名: 交流電動機のサイリスタ制御, 日立評論 52, 263 (昭45-3)
- (4) 岩田, 堀: 電動機制御分野での無接点化の方向, OHM 59, 102 (昭47-6)
- (5) P. G. Mesniaeff: Solid State Adjustable-Frequency AC Drives Control Eugg. 18, 57 (1971-11)
- (6) 電気学会編: 誘導機 (昭26-11)