

インバータによる電動機の制御

Adjustable Speed Drives of Inverter-fed AC Motors

インバータによる電動機の回転数制御は、繊維、製紙、工作機、計算機など各種の工業分野で従来から用いられている。近年の制御技術・回路技術の発達に伴い、インバータの適用分野も急速に拡大している。本稿では、電力用半導体素子であるサイリスタを用いたインバータに焦点を当て、その応用技術に関し具体例を挙げて説明するとともに、現状について紹介する。

インバータは多様な電動機機種に対応できるので、既設・新設の送風機、圧縮機、ポンプなどの風水力機械の省エネルギー運転設備、電動機の耐環境性を考慮し、保守性・保全性の向上に合致した省力設備及び簡便な回転数制御機能を生かし、駆動システムとしての低価格化を目的とした従来回転数制御分野への進出が著しい。

松 平 信 紀* Matsudaira Nobunori
小井戸 正之* Koido Masayuki
石 橋 耀** Ishibashi Akira
松 田 靖 夫*** Matsuda Yasuo

1 緒 言

インバータによる電動機の回転数制御は、駆動システムとしての簡便な回転数制御機能、高信頼性及び低価格の点から広範な用途に使用されている。インバータには強制転流能力が備わっており(自励式)、またインバータ制御装置による周波数制御機能により任意の設定周波数での運転が可能(他制式)であるため、容易に電動機の回転数制御を行なえる。更に、制御可能な電動機は、同期電動機、誘導電動機から特殊電動機(例えばヒステリシス電動機など)に至る多様な交流機にわたっている。容量範囲としては、数百ワットから数千キロワットに及び、単機運転だけでなく多数台の揃速運転が可能である。

回転体の起動加速に際しても、ソフトスタート機能をもつため、電動機や負荷に与える熱的・機械的ショックも軽微であり、従来の中・小容量機制御だけでなく、大容量機への適用は今後とも増加の傾向が続くものと考えられる。

インバータによる回転数制御のニーズは、おおむね図1に

示すように仕分けでき、それに対して日立製作所では、図2に示すようなインバータタイプを供給することができる。

2 インバータによる回転数制御の原理

以下に交流電動機の回転数制御の方法を概括する。

交流電動機の回転数を n rpm、電源周波数を f Hz、すべりを s 、極数を p とするとき

$$n = \frac{120f(1-s)}{p} \dots\dots\dots(1)$$

の関係が成立する。インバータによる回転数制御法は、対象電動機によらず積極的に周波数を変えることにある。このとき、電動機の磁束密度を低周波数運転時にも一定値以下とするには、磁束 Φ 、電源電圧 V 及び周波数の関係(k は定数)

$$\Phi = \frac{kV}{f} \dots\dots\dots(2)$$

より V/f の比を一定に保てばよく、図3に示すように誘導機

	電 動 機 容 量		
	10kW	100kW	1,000kW
誘導電動機	急 加 減 速 制 御		
	耐 環 境 性		
	保 守 性 ・ 保 全 性		
	省 エ ネ ル ギ ー 運 転		
	シ ョ ッ ク レ ス 起 動		
同期電動機	高 回 転 数 制 御		
	高 精 密 制 御		
	高 性 能 ・ 高 効 率		
共通ニーズ	高 信 頼 性		
	低 価 格		

図1 インバータを適用すれば、回転数制御のニーズの大部分にこたえることができる。

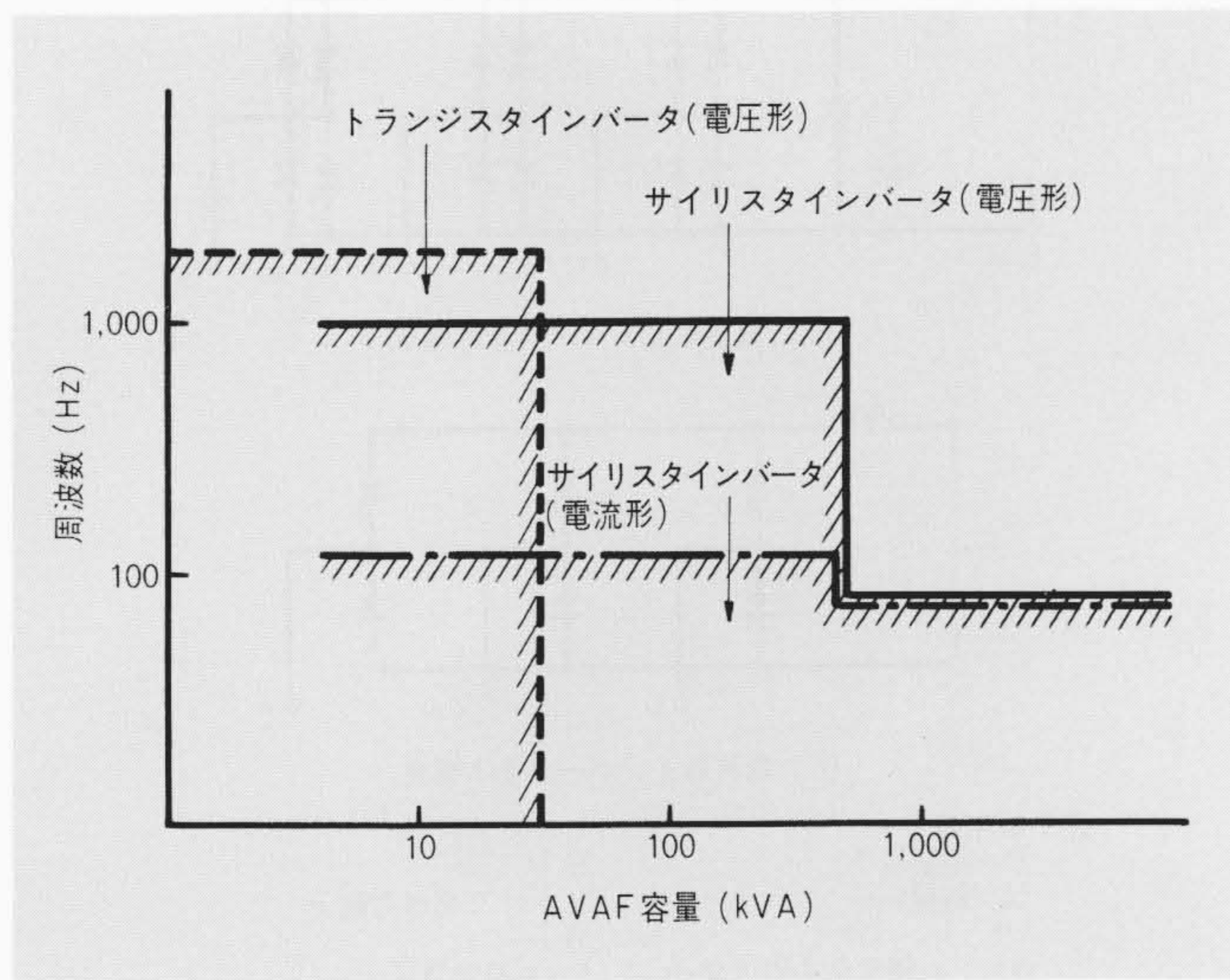


図2 インバータ方式と容量系列 インバータ(AVAF)の用途に応じて、タイプ及び容量の選択ができる。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所習志野工場 *** 日立製作所日立研究所

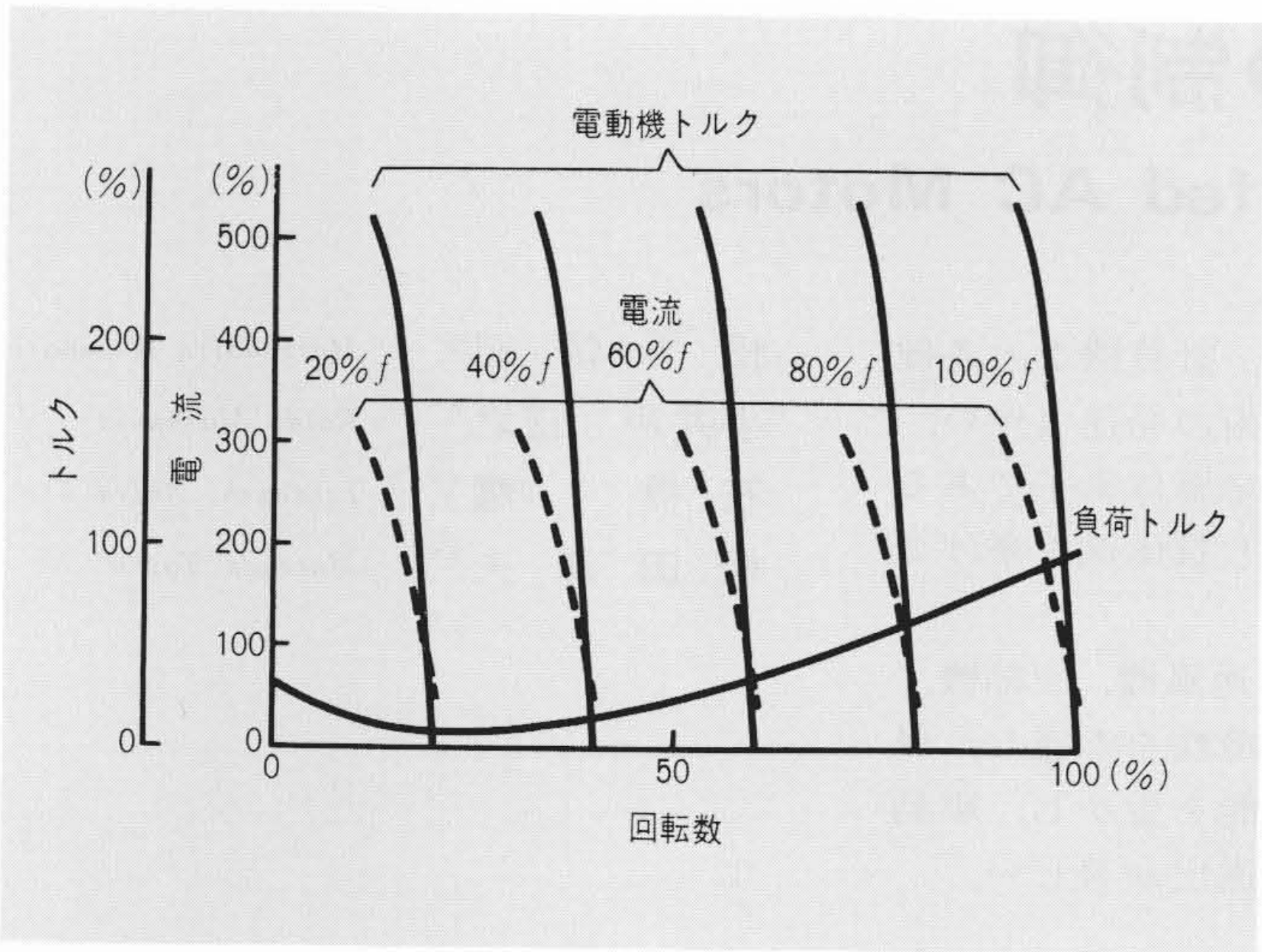


図3 AVAF制御時のトルク、電流特性 電動機端子電圧と周波数との比(V/f比)をほぼ一定に制御したときの特性を示す。

の場合、回転数-トルク特性は周波数に対して比例して変化する。このときの動作点は、インバータ出力周波数での電動機トルクカーブと負荷トルクカーブとの交点になる。

このような可変電圧可変周波数制御を行なうインバータ(Adjustable Voltage Adjustable Frequency Inverter; 以下、AVAFと略す)は、一般的に商用電力を直流電力に変

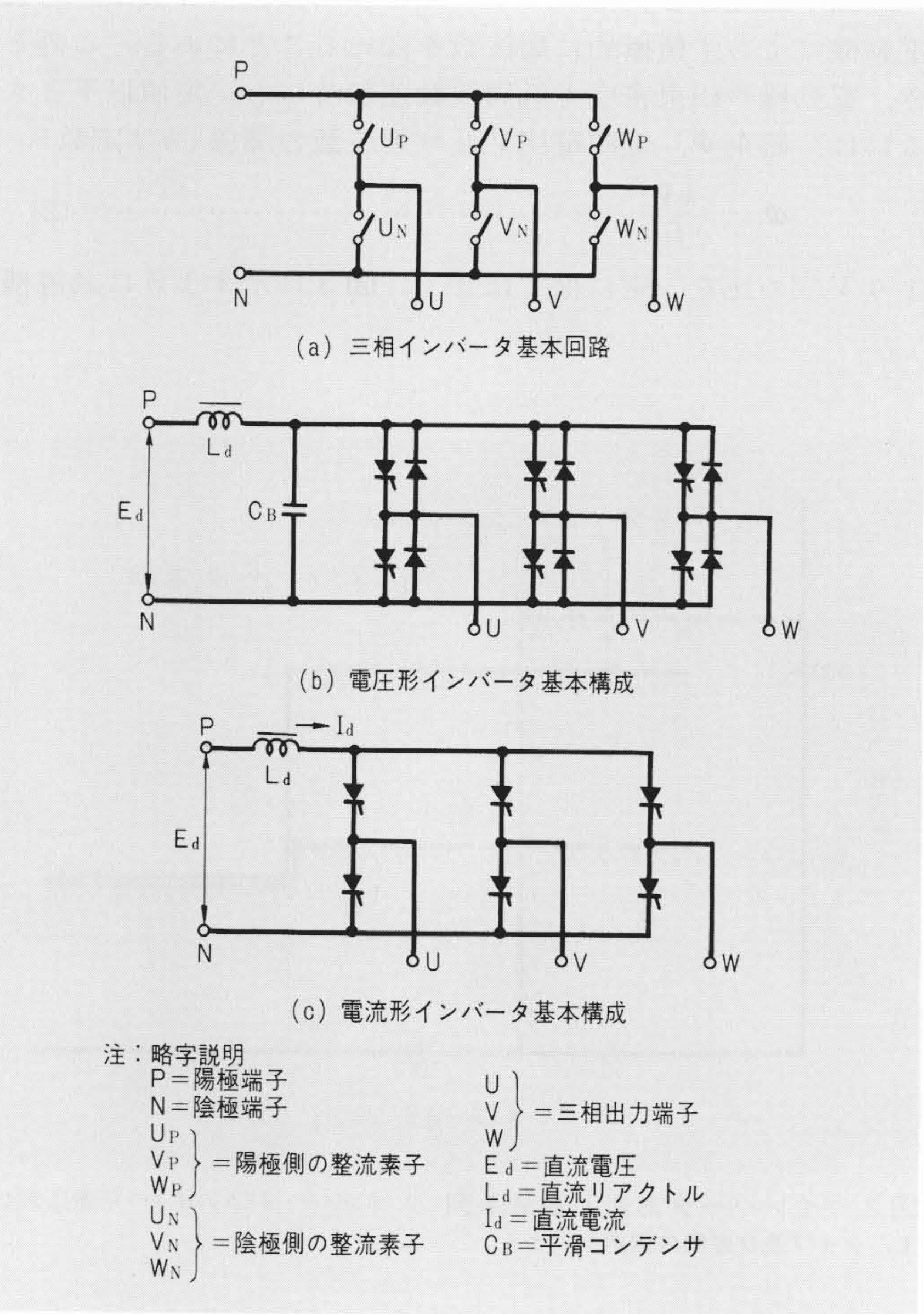


図4 三相インバータの基本回路 インバータの基本動作は、機械的なスイッチ動作と等価に考えることができる。

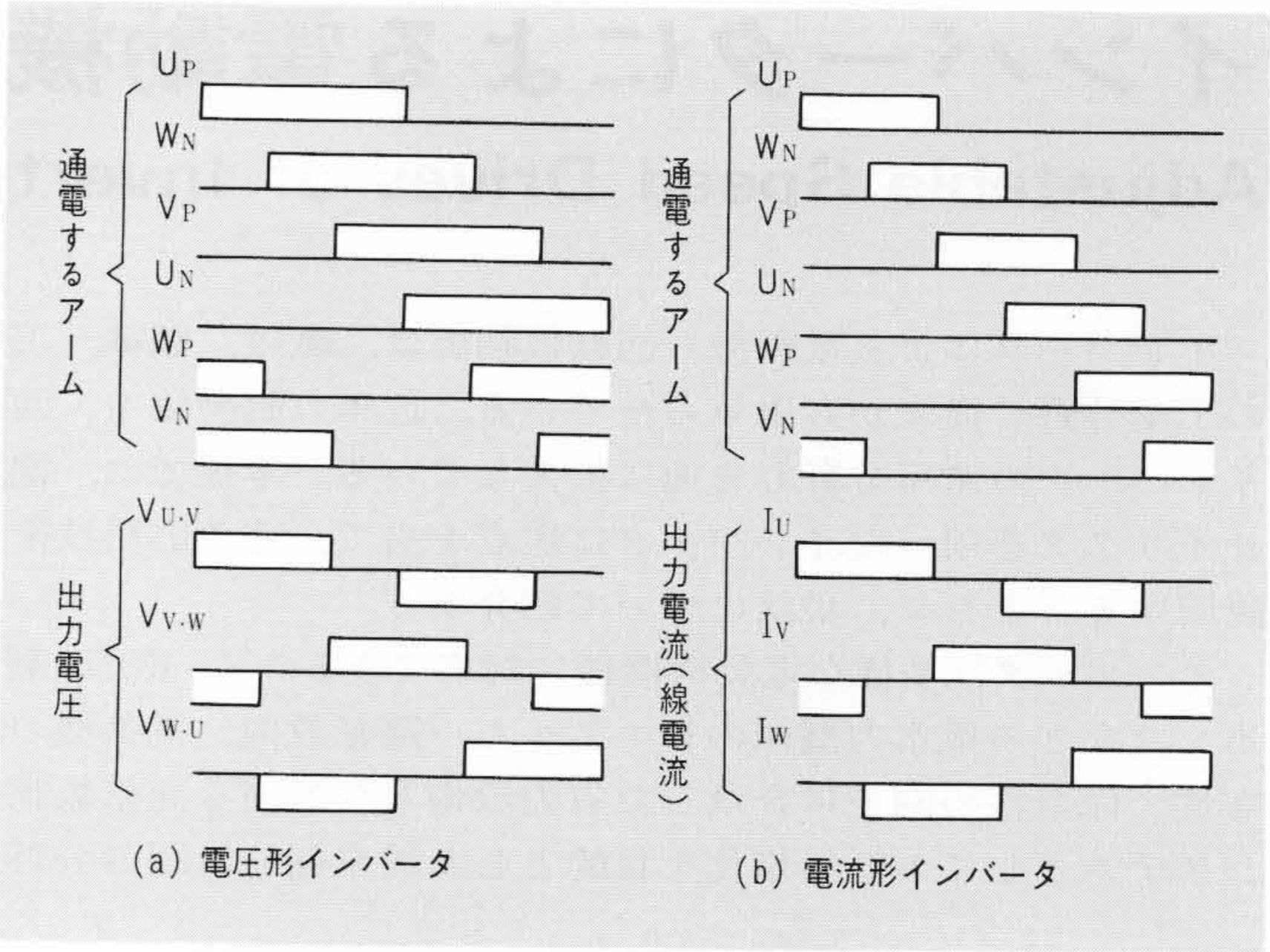


図5 三相インバータのスイッチ動作の順序 電圧形インバータ及び電流形インバータでの各アームのスイッチ動作の順序を示す。

換する整流器部分と、直流電力を任意の周波数の交流出力に変換するインバータ部分とに分かれる。インバータ動作の原理は、インバータ部分に用いられる半導体素子を機械的なスイッチに置き換えると理解しやすい。このスイッチのオン・オフ周期制御によって出力周波数制御が可能となる。

図4(a)に三相インバータの基本回路を示す。スイッチのオン期間によって電圧形インバータと電流形インバータとの違いが生ずる。図4(b), (c)にその基本構成を示す。同図の直流電源P～N間に直列に接続されたスイッチ3群の各アームの通電期間一周期分を図5に示す。直流電源に関して、電圧形インバータの場合は直流電圧源、電流形インバータの場合は直流電流源と考えると、負荷側からインバータを見た場合も同様に電圧源、電流源となり、理想出力波形は方形波になって負荷電動機に供給される。

3 AVAFによる回転数制御の特長

AVAFによる電動機回転数制御は、次のような特長をもっている。

(1) 同期電動機、誘導電動機など、電動機の種類によらず回転数制御が可能である。

AVAF制御によれば、高度な安定度向上を必要とする重慣性負荷駆動用同期電動機の場合でも、機械的な軸位置検出機構なしで安定に駆動できる。したがって、既設設備にAVAFを付加すれば容易に回転数制御システムを作ることができる。

(2) 広範な回転数制御が可能である。

AVAFは強制転流回路を保持しているので、どのような回転数制御範囲にも対応できる。通常10：1、必要に応じて20：1～100：1といった広範囲な回転数制御が可能である。低圧同期電動機を起動する場合、必要ならば直流励磁も直流制動も可能である。制御範囲の下限とAVAF容量とは無関係である。

(3) 多数台の回転数制御が可能である。

電動機の単機駆動は多数台の電動機の揃速制御が可能である。AVAFの回転数制御はオープンループ制御が可能のため、多数台の並列運転が極めて容易である。

AVAFを起動装置として大容量電動機のオン・オフ制御を行なう用途では、単機駆動のAVAF容量で複数台の電動機の共通起動装置とすることができ、設備費の大幅な軽減が

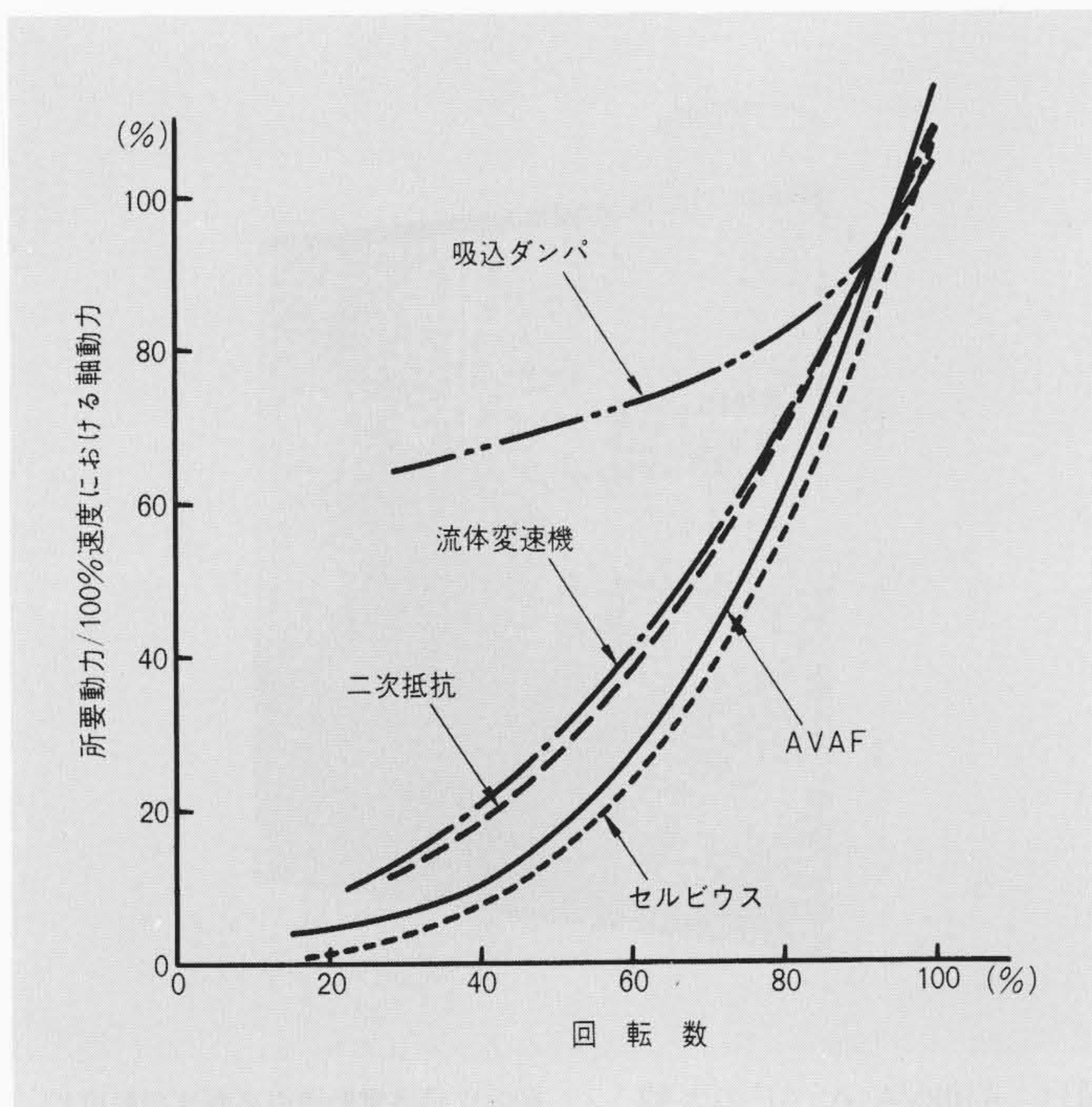


図6 各種駆動方式別の所要動力比較 1,000kW級の送風機駆動の場合の回転数-所要動力の関係を示す。送風機、ポンプなどでは、回転数制御による省エネルギー効果が顕著に表われる。

可能である。

(4) 力行(駆動)・回生、正転・逆転のいわゆる4象限運転が可能である。

これらの4象限運転は、無接点で制御されるため保守性、安全性に優れた装置を提供できる。

(5) 高精度運転が可能である。

周波数安定度については、必要に応じ0.1%以下の精度保証も可能で、同期電動機駆動の場合高回転数精度が得られる。誘導電動機の場合もASR(自動速度制御)にすれば高精度運転ができる。また、適当な位置センサと直流制動との組合せにより、高精度位置停止も可能である。

(6) 高頻度起動ないしは加減速に対応可能である。

AVAFによる速度制御はじか入れ起動の場合を除き本質的にソフトスタート方式になっており、起動電流が小さいため電動機の温度上昇が低く、起動時に過大トルクの発生もないので、高頻度な速度変動サイクルに対応できる。

(7) 急速加減速制御が可能である。

ゼロ速度から最高速度までの所要時間が約1秒といった高速応答が可能である。小容量電動機の場合の応答性については、直流方式(サイリスタレオナード)に比べ遜色のない結果が得られる。追従遅れは、ほぼ負荷の機械的時定数で決まる。

(8) バックアップ運転が可能である。

商用周波数での運転が可能な場合、万一AVAFがダウンした場合、商用運転に切り換えることによって装置の稼働率を向上できる。

また、商用周波数での運転時間が長ければ、いったんAVAF運転から商用電源運転に切り換えて高効率運転が可能となる。

(9) 高信頼度電源である。

停電後の復電時の自動再スタートや、万一の転流失敗時の再スタートが容易である。

(10) 省エネルギー設備である。

図6に示すように、送風機やポンプなどの風水力機械に適

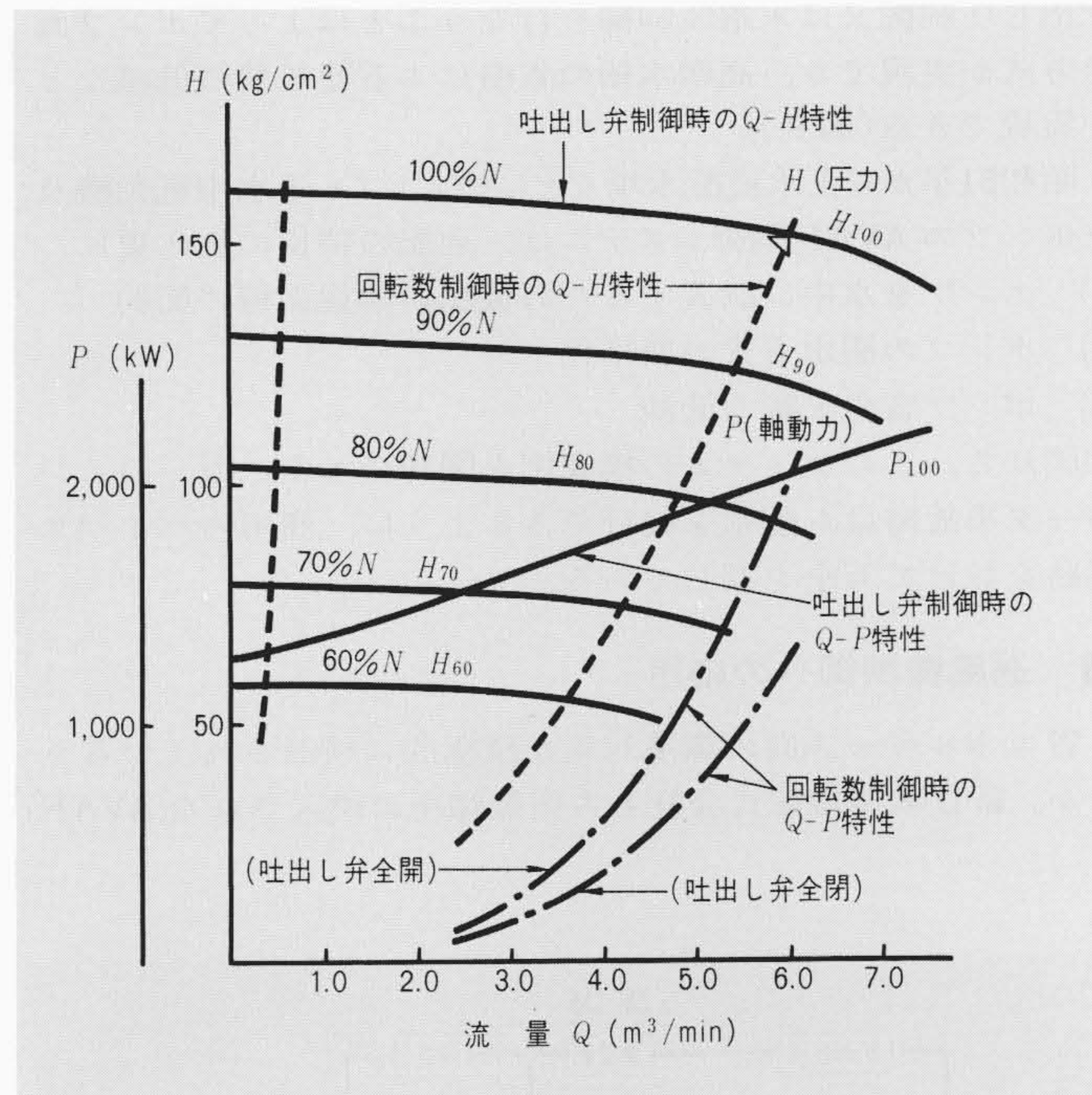


図7 ポンプの流量-圧力特性及び流量-軸動力特性 吐出し弁の開度調節時の特性と速度制御時の特性の相違を示す。実揚程をゼロとした2,000kW級高圧ポンプの例である。

用すれば回転数制御による大幅な省電力効果が得られる。また、既設設備に付加して省エネルギー効果を上げるには、まずAVAFの適用が挙げられる。

4 ポンプ制御への応用

上下水道システムでのポンプの速度制御は、日立製作所では従来からセルビウス方式、HCモートル(うず電流継手付電動機)方式で多数の納入実績をもっているが、省エネルギー、メンテナンスフリー及び停電対策の点からかご形電動機のAVAF制御が注目されてきた。

配水用にAVAFを採用する場合、通常1~2台を回転数制御し、他は定速ポンプとして使用するのが一般的である。短期的・長期的な配水量の変化に応じて、ポンプ台数制御及び回転数制御を併用すると電力節減ができる(図7, 8)。更に、

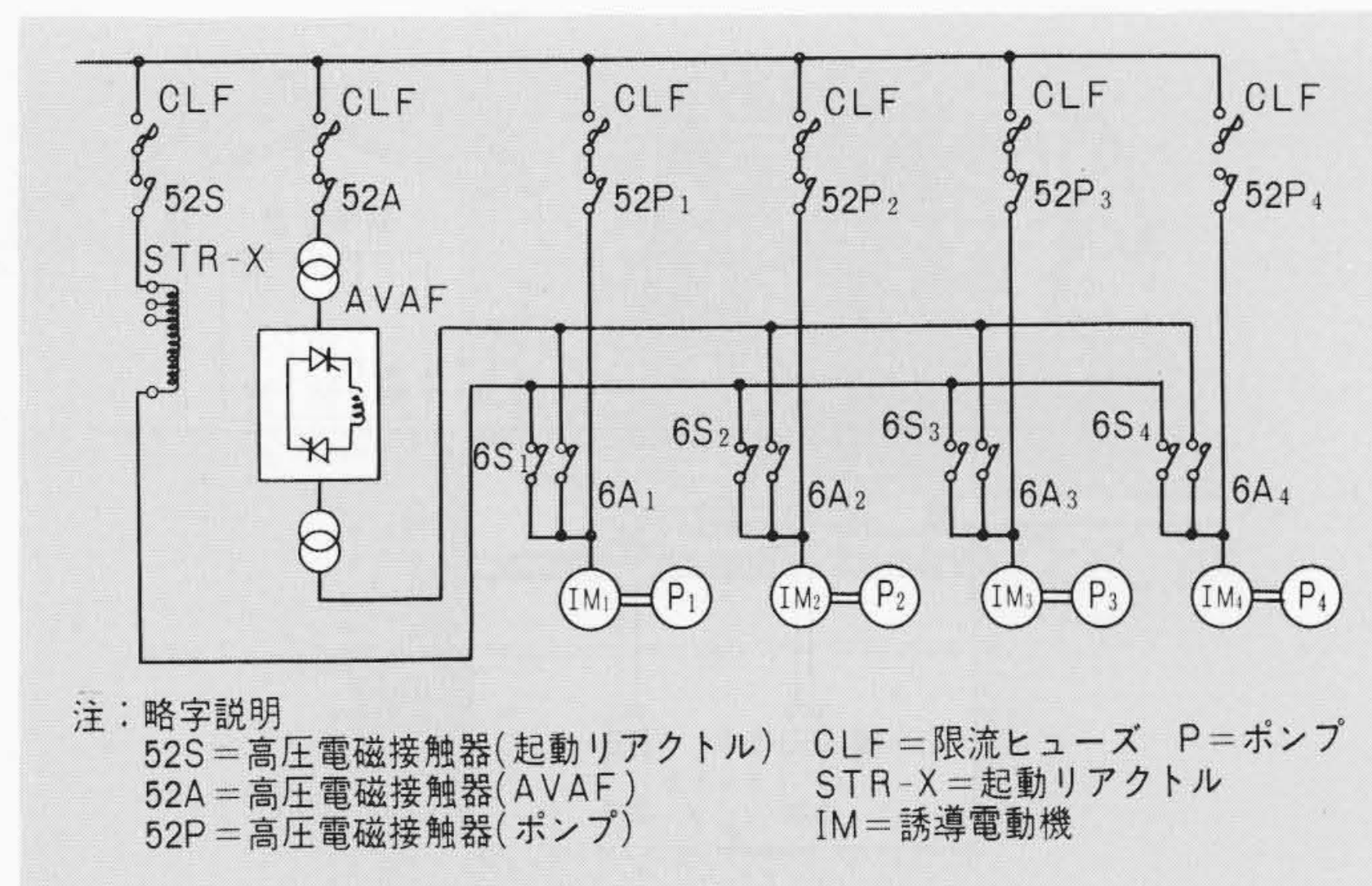


図8 ポンプ駆動システムの適用例 AVAF 1台とポンプ4台による台数制御及び速度制御の併用システムを示す。AVAFは任意の駆動電動機に接続され、速度制御を行なうことができる。

吐出し圧制御又は末端圧制御を行なうことによってポンプ直送方式が実現でき、高架水槽の省略による建設費の低減などが実現できる(図9)。

昭和51年から上水道配水場などに納入している水中電動機及びポンプのAVAF制御システムは、前記の特長に加え更に、

- (1) ポンプを水中に設置するため機場の建屋面積の節約
- (2) ポンプの満水方式の簡略化
- (3) ポンプ音の大幅な低減

が図れる。このシステムの構成例を図10に示す。万一のインバータ事故時にも配水を続行できるように、商用のバイパス回路を設けて万全を期している。

5 送風機制御への応用

省エネルギー志向の環境対策が積極的に検討されているなか、新日本製鐵株式会社名古屋製鐵所に納入されたAVAF



図11 410kVA AVAFの外観 1,800kW誘導電動機の高頻度起動用として使用されている。

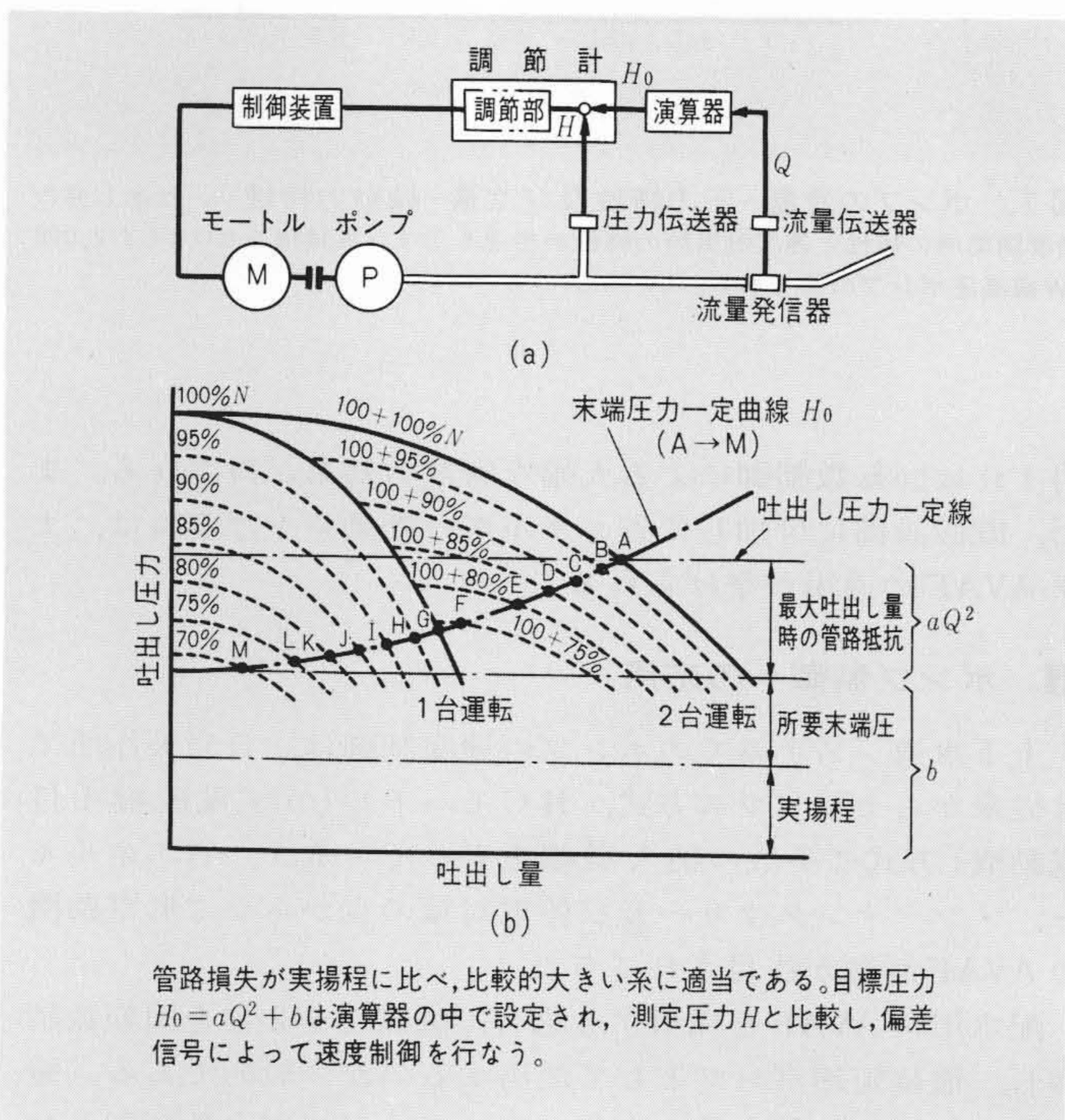


図9 末端圧力一定の速度制御特性曲線 ポンプの台数制御と速度制御を併用した場合の末端圧力一定制御の一例を示す。

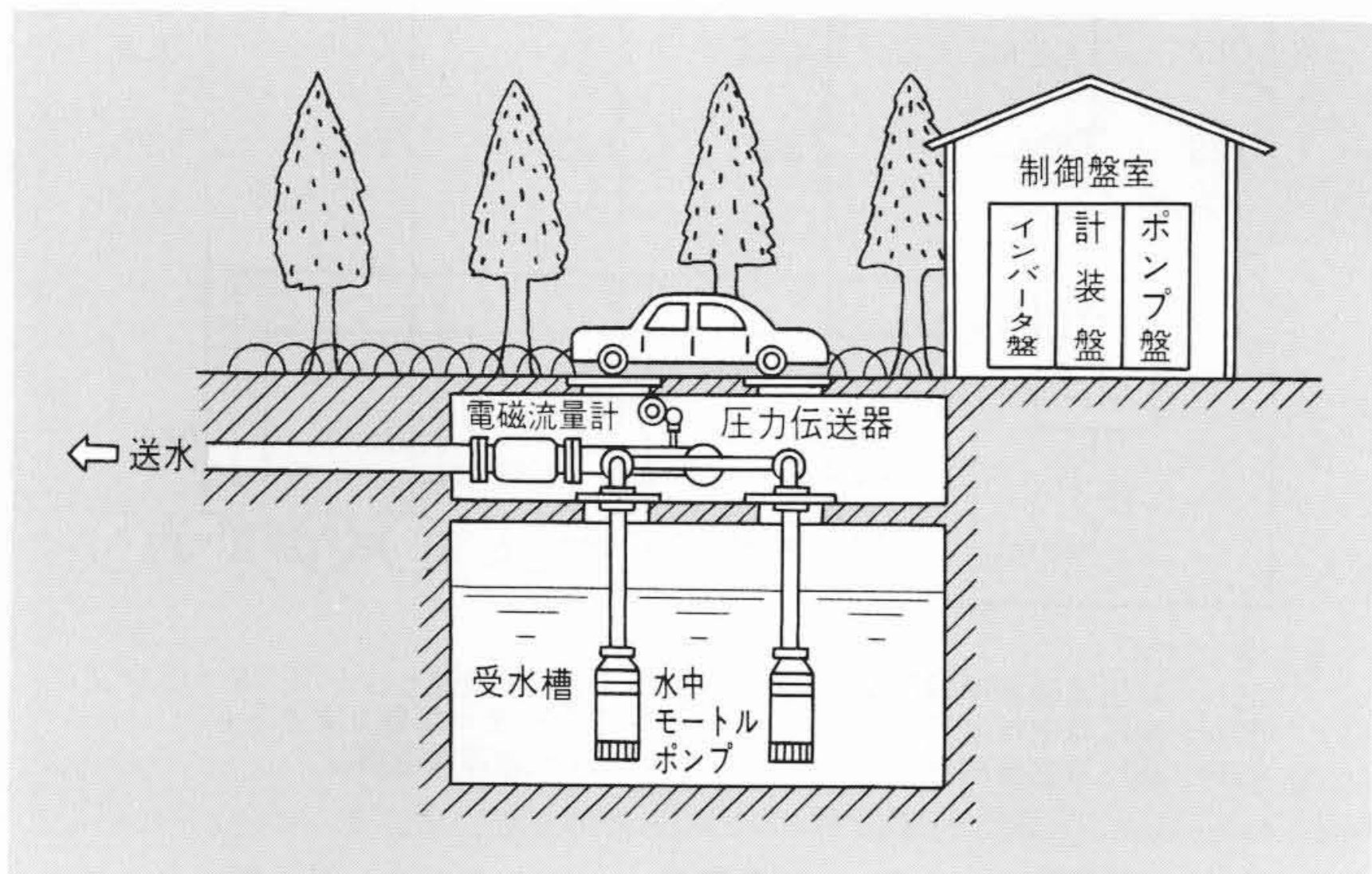
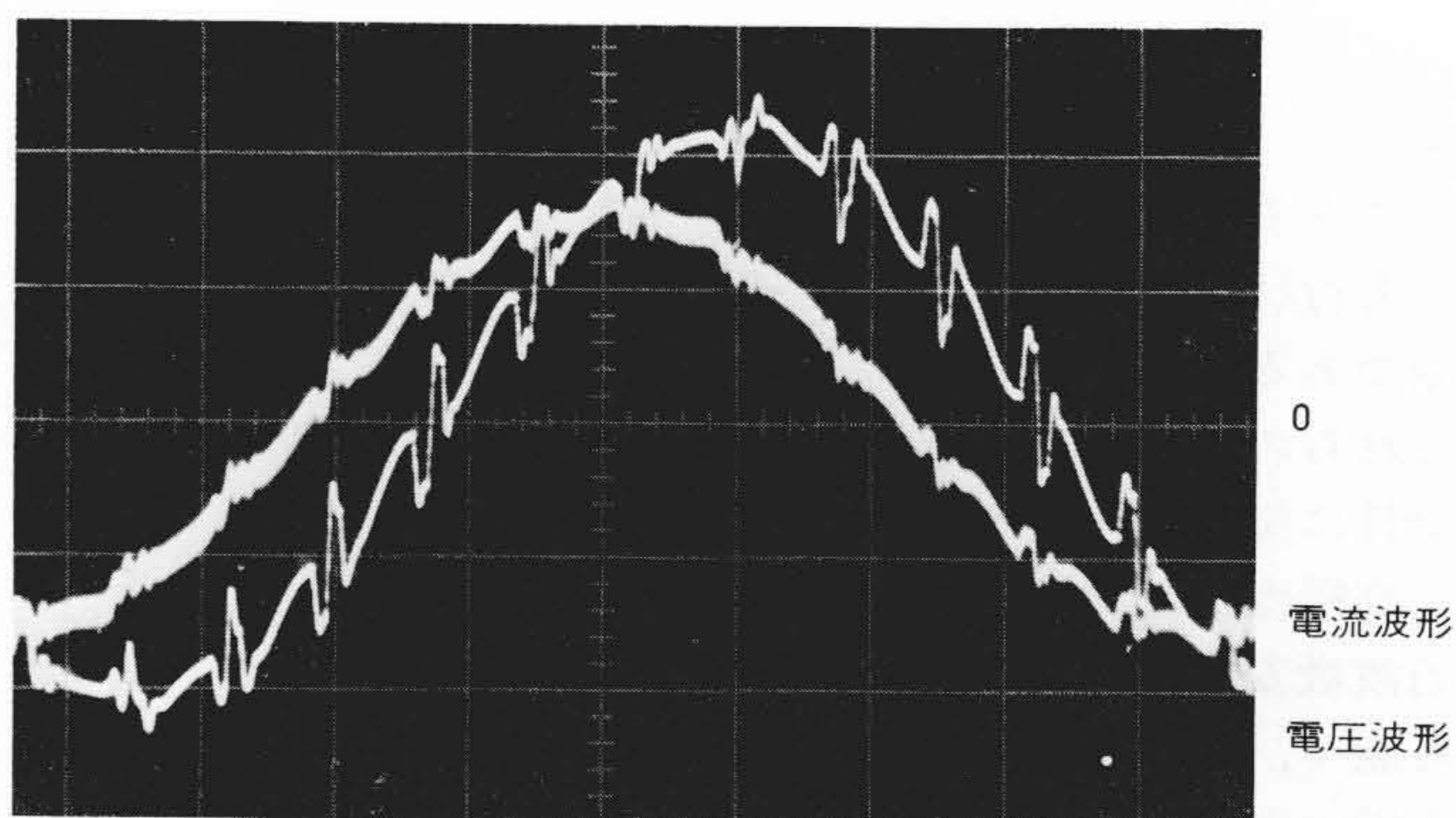
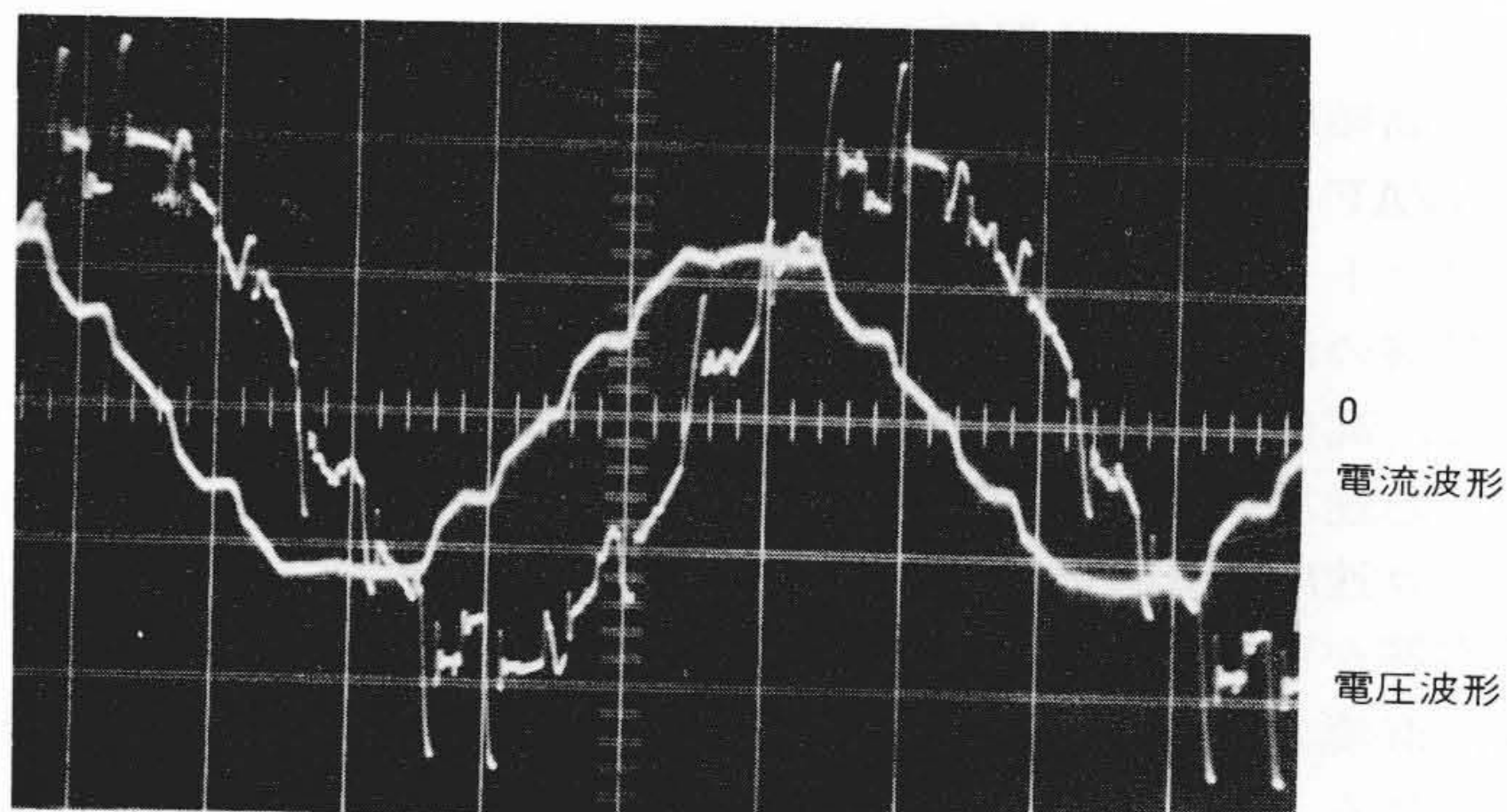


図10 上水道配水場におけるポンプ制御 地下水槽中に電動機及びポンプが設置されている。愛知県御津町に納入のシステム構成例を示す。



(a)電圧形AVAF出力波形



(b)電流形AVAF出力波形

図12 多重化による波形の改善 電圧形インバータ及び電流形インバータによる二重化の場合の波形改善例を示す。二重化により五次、七次高調波が激減し、ひずみ率も10%強に減少している。

は、数年前納入された1,800kW誘導電動機駆動(コンドルファ起動)の集塵ファン設備にソフトスタート用のAVAFを付加して、発塵パターンに合わせたオン・オフ制御を行ない、最大限に省エネルギー効果を高めたシステムとして、当時としてはAVAFによるこの種大形機の制御は他に類例がなく、

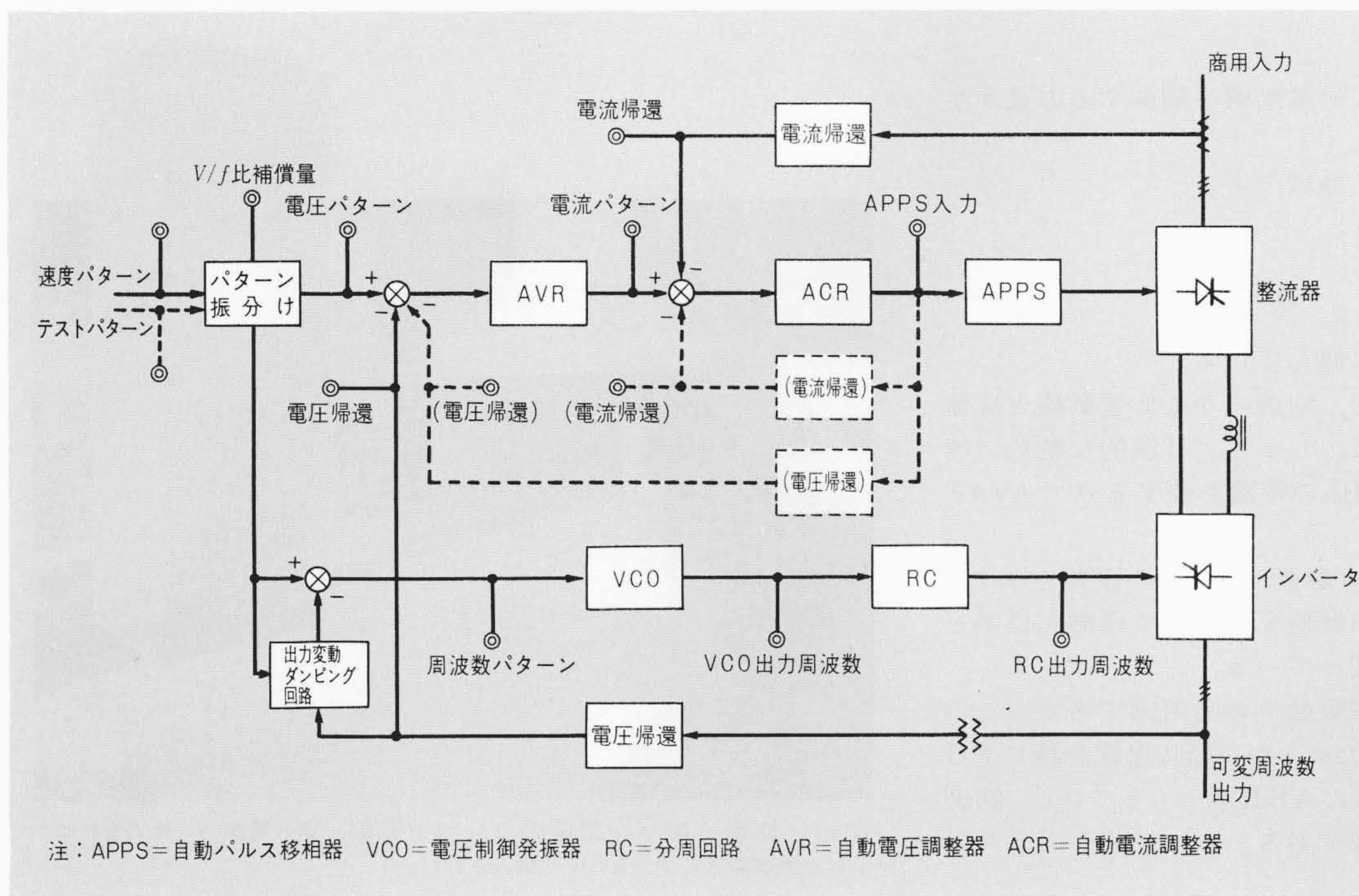


図13 AVAFの制御ブロック図
図中の点線部分は、閉ループチェック時に構成される（ループチェック機能をもつ構成例を示す）。

以後各方面で採用されるきっかけとなった(図11)。

回転数制御は V/f 比一定制御であるため、起動電流が小さく電動機へ与える熱応力も小さい。また、過渡電流も極小になるよう配慮されていて、電動機、ファンの軸系に与える過渡トルクも小さい。したがって、ファン・ブロワ設備へのAVAFの適用は起動装置用だけでなく、連続運転・速度制御用としても好適である。

送風機制御の場合、一般に送風機 GD^2 は電動機 GD^2 の約10倍近い値であるため、AVAFの出力波形ひずみによる高調波トルクが駆動軸系のねじり共振周波数と一致するとき、増幅されて表われることがある。このときの脈動軸伝達トルクが大きいと軸系に損傷を及ぼす恐れがあるが、対策としてAVAFの多重化を行なうのが最も望ましい^{*1)}。多重化の効果としては、高調波トルクの低減とともに、一次の共振点をAVAF運転周波数以下にしてしまうことも容易である。図12に、電圧形、電流形での二重化による出力波形改善例を示す。

6 テーブルローラ制御への応用

近年、鉄鋼業での補機用電動機は、低価格及びメンテナンスフリーの見地から交流化、ブラシレス化の動きが盛んであり、鋼材搬送用テーブルローラ駆動にもAVAFが続々と採用されている。この用途は大きな慣性をもっている鋼材の急加減速を必要としているため、電流形AVAFが適している。特に減速時には、鋼材及びローラに蓄えられた運動エネルギーを電源側に簡単に回生できるので、効率的な制動効果が得られる。また、電流形AVAFには図13に示すようにマイナ電流制御ループをもつので、インバータ出力の短絡若しくは電動機の拘束試験のような過酷な運転を行なっても、過電流制限機能により転流失敗やヒューズ溶断などのトラブルには至らない(図14)。

直流制動については、インバータ部のゲート位相をロックす

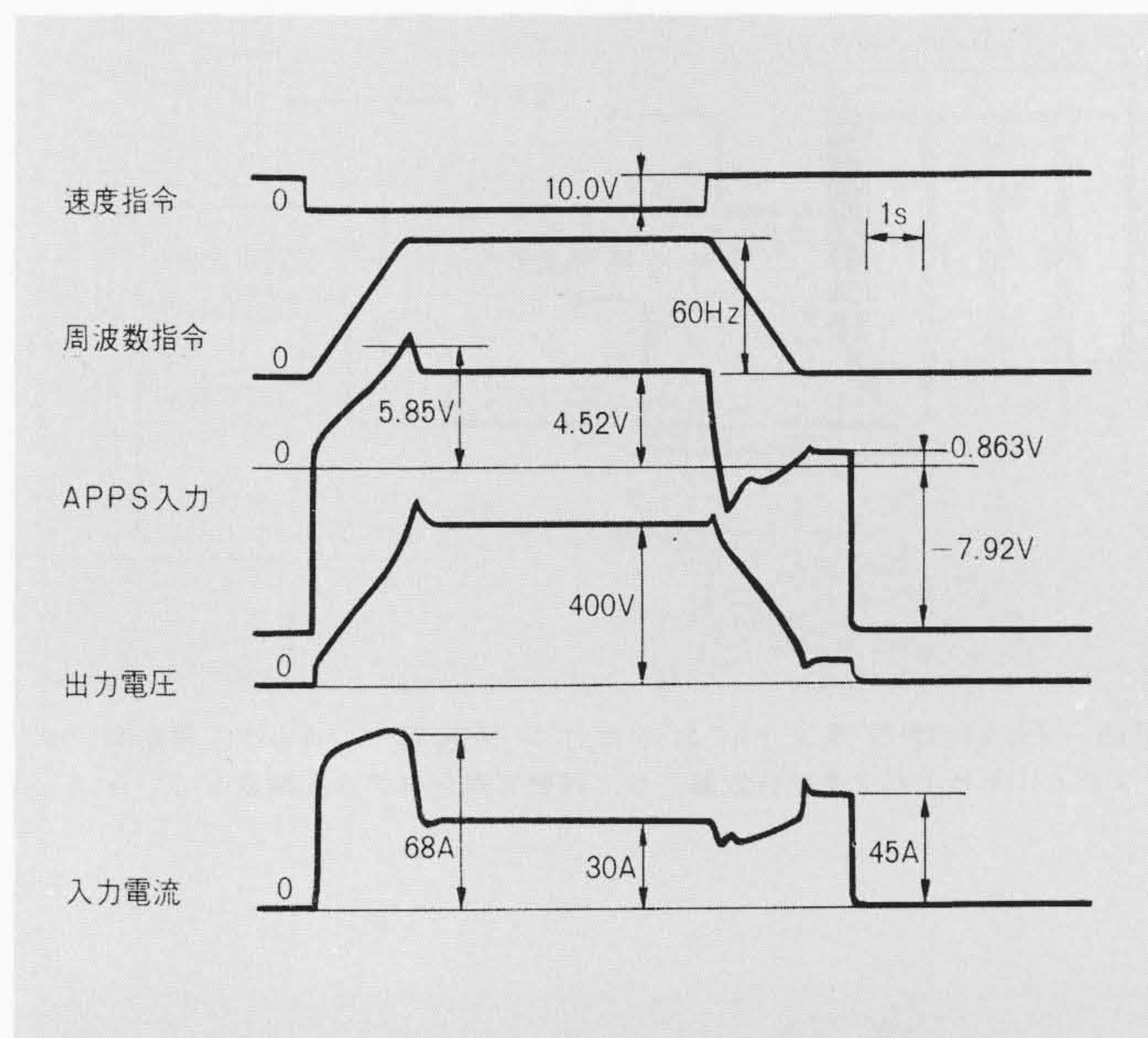


図14 電動機加減速時のオシログラム テーブルローラでのテーブル速度の加減速時のオシログラムを示す。

るだけで所定の直流電流を電動機に通電できるので、発電制動が行なわれる。位置センサをラインに適当に設置すれば、回生制動状態から連続的に発電制動への移行が可能となり、高精度な定位置停止が行なえる^{*2)}。

更に中央のプロセスコンピュータとの連携を行なえば、高度な搬送システムをこなすことができる。

このようなメリットから新日本製鐵株式会社、日本鋼管株式会社、日新製鋼株式会社ほかに納入し、いずれも現在順調に稼動している。

※ 1) 特許申請中

※ 2) 特許申請中

7 化学プラントへの応用

近年、AVAFにより防爆かご形電動機を制御する方式が注目されている。すなわち、

- (1) 電動機設置場所が防爆指定地域である。
- (2) 高効率に変速運転を行なう。
- (3) メンテナンスを簡単にする。
- (4) 高精度の回転制御を行なう。

といった要求がある場合に特に適している。

従来はこれらの要求に対して、定速のかご形電動機と流体継手を用いるのが普通であった。しかし、寸法的な制約、速度応答性及び操作性、油・水関係の補機を要する点でAVAF方式に劣る。

図15に重化学プラントのポンプ駆動システムの概要を示す。システムの性質上、各2系統の機器を設置して待機冗長系とし、システム信頼度の向上を図っている。

図16は化学反応槽での攪拌機駆動への応用例である。この例では特に速度精度を高くするため、かご形防爆電動機にPG(パルスゼネレータ)を取り付けたASR系をもっている。制御ブロック図は前出の図13と同様である。

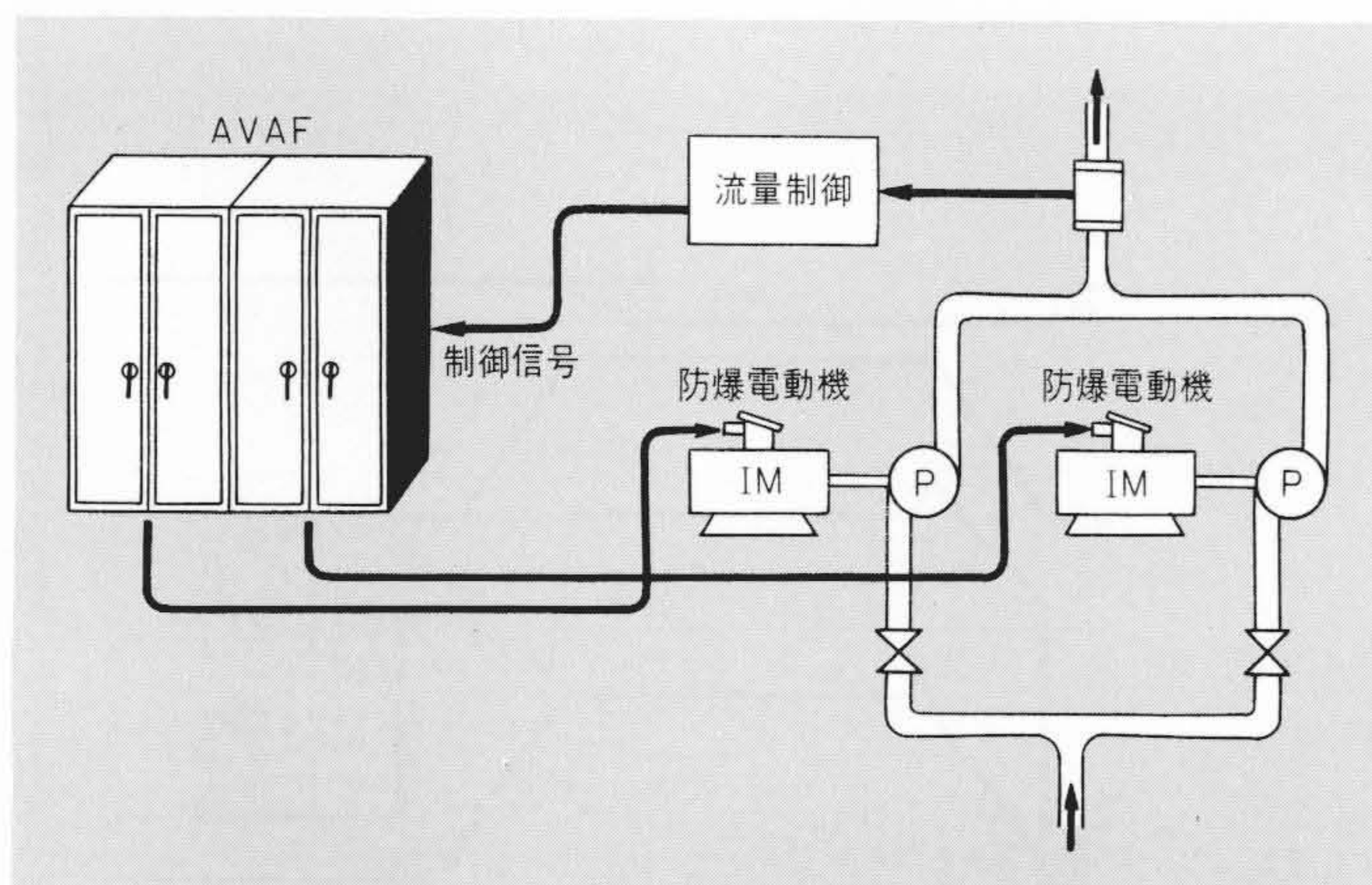


図15 石油化学プラントにおけるポンプ制御 AVAF、電動機、ポンプともにそれぞれ2系統分設置され、待機冗長システムを構成している。

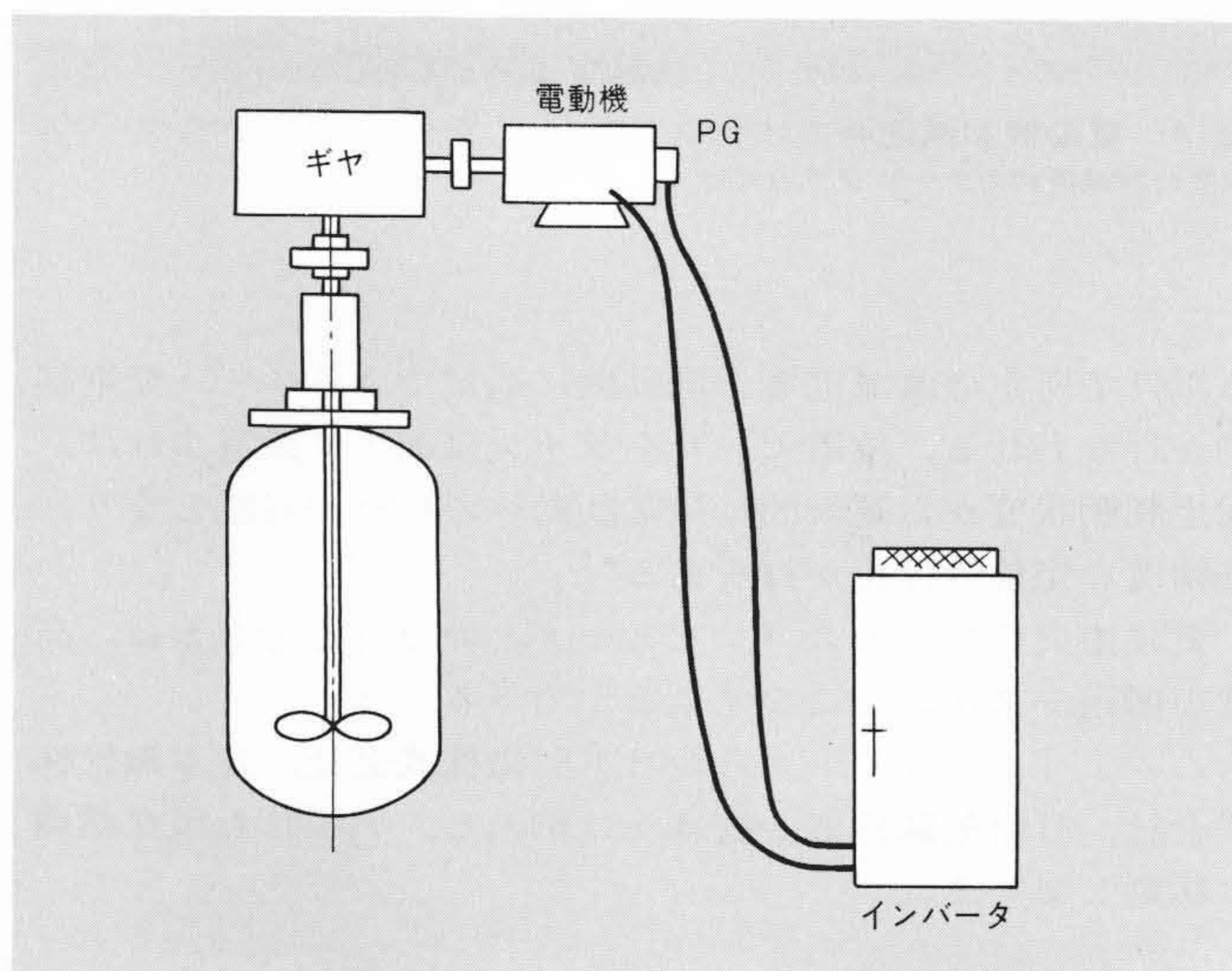


図16 攪拌機への適用 電動機は防爆構造であり、ASR系により高精度で速度制御される。

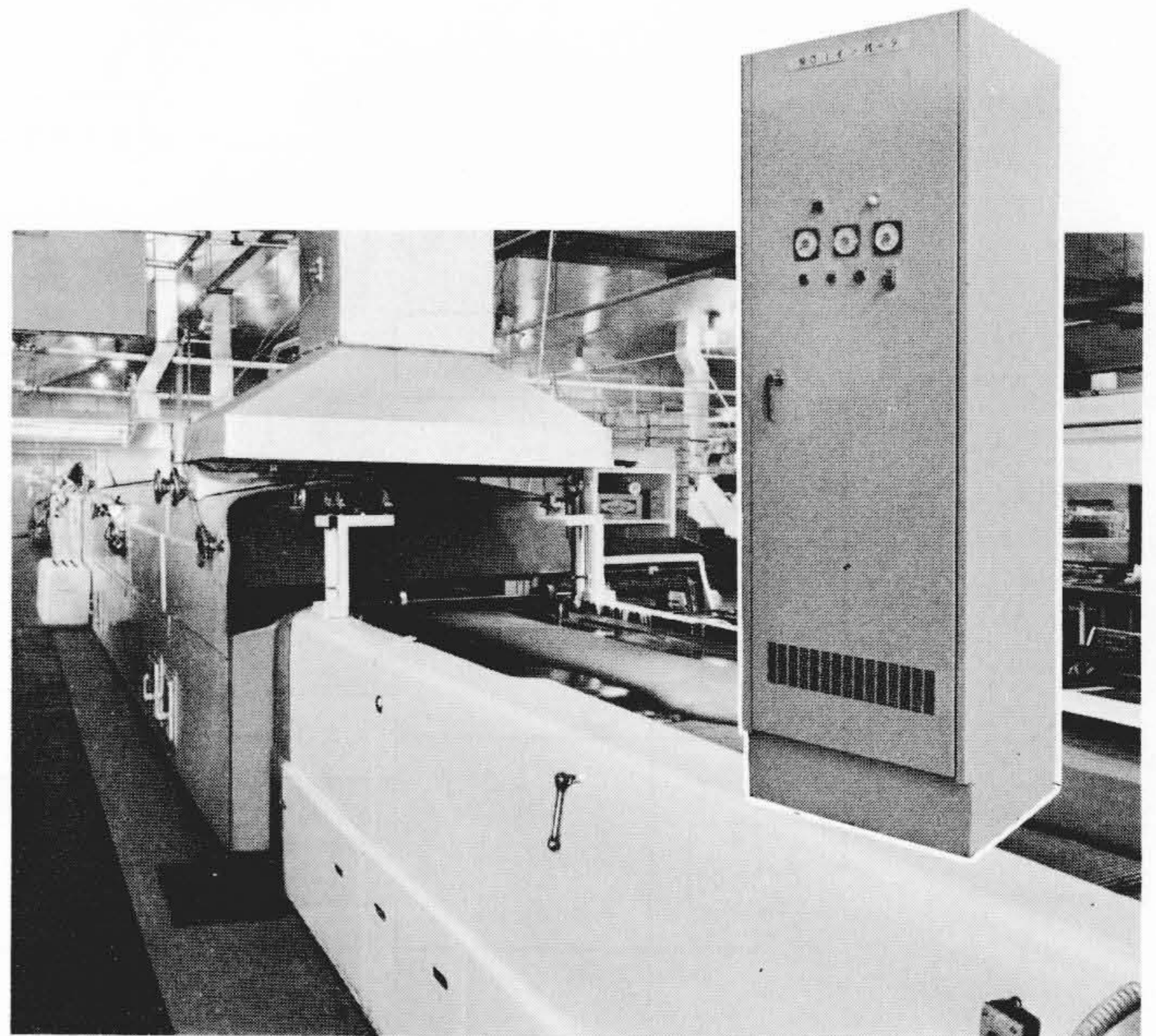


図17 製菓・製パン工場のコンベヤ制御 第一屋製パン株式会社のコンベヤ制御用として、AVAFが納入された。

8 その他の応用例

食品工業では、自動化が進むにつれて可変速電動機の需要が高まっているが、耐環境性及びメンテナンスフリーの点でブラシレス化が必須条件である。図17に示す製菓・製パン機械駆動用のAVAFは、多数のMSモートル(永久磁石式同期電動機)を揃速運転するものである。同期電動機を使用することにより、簡単な機械伝達機構だけで各機械軸の同期運転ができる。

また日立製作所では、磁気テープ製造ラインでの各ローラ駆動電動機の個別制御用AVAFも多数納入している。各ローラ間は互いに関連制御されており、例えば巻取り制御、デジタル式精密ドロー調整装置による分解能0.02%程度の精密ドロー制御、張力制御などがある。特に防爆形電動機を必要とする場合にメリットが大である。

トランジスタインバータは、小形・軽量で高周波数運転が可能といった特長があり、日立製作所では工作機械や磁気ドラム、ディスク駆動用として各方面に多数納入されている。例えば、工作機のスピンドル駆動用として12.5kVA、2,500Hzの大容量インバータの製作実績をもっている。トランジスタインバータについては、この特集の別稿「ゲートターンオフサイリスタを用いたインバータとその応用」で述べていると同様に、今後いっそう素子の大容量化が進むにつれて、その適用分野の拡大が期待される。

9 結 言

以上、本稿では最近のインバータによる電動機の世界制御の傾向と、その応用例としてポンプの台数制御と速度制御の併用法、送風機設備の省エネルギー運転、鉄鋼業の補機電動機の急加減速制御及び化学プラントにおける電動機の精密制御と省エネルギー運転ほかについて述べた。

今後、パワー用、制御用エレクトロニクスのいっそうの進展に伴い、新機能素子をも含めた応用技術の急速な展開が図られ、現在のインバータでは十分に応じられなかった多様な性能・特性をも満足できることになれば、その用途は更に増大していくものと確信する。