

ACドライブシステムの現状と展望

State-of-the-Art AC Drive Systems

齋藤 奎二* Keiji Saitō
木脇 久勝** Hisakatsu Kiwaki
渡辺 一郎*** Ichirō Watanabe

AC可変速ドライブシステムは、パワーエレクトロニクス及びマイクロコンピュータの進歩により、その適用が広い範囲に拡大している。また、AC可変速ドライブシステムは数千キロワットの圧延機、圧縮機などの駆動から数ワットのFA、OA機器の駆動まで広く用いられている。従来からのサイリスタに加え、パワートランジスタ、GTOサイリスタなどの電力制御素子が発展したことと、ベクトル制御理論、現代制御理論などの技術がマイクロコンピュータにより容易に適用可能となったことなどにより、AC可変速ドライブシステムは従来の直流機以上の性能が出せるようになった。

本稿では現状の技術に至る歴史的背景をとらえ、ACドライブの中心技術であるPWM制御、ベクトル制御、現代制御理論、更にこれら制御システムを構築するマイクロコンピュータ技術の現状と展望について論述した。今後、あらゆる分野にわたってACドライブが拡大適用されることが期待されている。

1 緒言

AC可変速ドライブシステムは、マイクロエレクトロニクス及びパワーエレクトロニクス適用の依存度を高めながら、性能、機能、信頼性、寸法、価格などに関して著しい進歩、発展がなされている。AC可変速ドライブには、世界的な傾向としてデジタル化があり、現代制御理論及びベクトル制御理論の適用を容易にし、制御の高度化を促進した。このことにより、高保守性、省エネルギー、高性能及び高機能をもつドライブシステムとして実現し、ここ数年の間に実用化され大きな進歩を遂げている。当初、省エネルギーを目的としたポンプやファンの可変速運転から、広い可変速範囲と高性能を必要とする鉄鋼圧延機、車両、エレベーター、更に空調機などの小容量駆動システムまで適用が拡大している。本稿では、AC可変速ドライブの技術動向と将来の展望について述べる。

2 ACドライブシステムの現状とニーズ

2.1 ドライブシステムの現状

AC可変速ドライブの技術的な進歩は、パワーエレクトロニクス及びマイクロエレクトロニクスの発展と密接な関係をもっている。図1は、パワーデバイスの処理できる電力とスイッチング周波数の現状を示したもので、最近では特に各種のパワートランジスタやGTO(Gate Turn Off)サイリスタなどの自己消弧素子の大容量化が目覚ましい。例えば、バイポーラトランジスタでは、モジュールとして4,500V、2,000~3,000A級のものが実用化された。これらの自己消弧素子を用いた可変速ドライブシステムは、従来のサイリスタ制御方式の一部をも置換しながら、適用範囲を急速に拡大している。その結果、各種可変速ドライブシステムの現状の適用範囲は、電動機の容量と回転数の関係で表わすとおおむね図2に示すようになっている。一方、マイクロコンピュータはLSI技術の進歩とともに、集積度、演算速度が向上しており、デジタル制御の実用化を決定的なものとし現代制御理論やベクトル制御理論の適用が容易となり、AC可変速ドライブの性能や機能が質的に著しく向上している。従来、直流機ドライブで達成さ

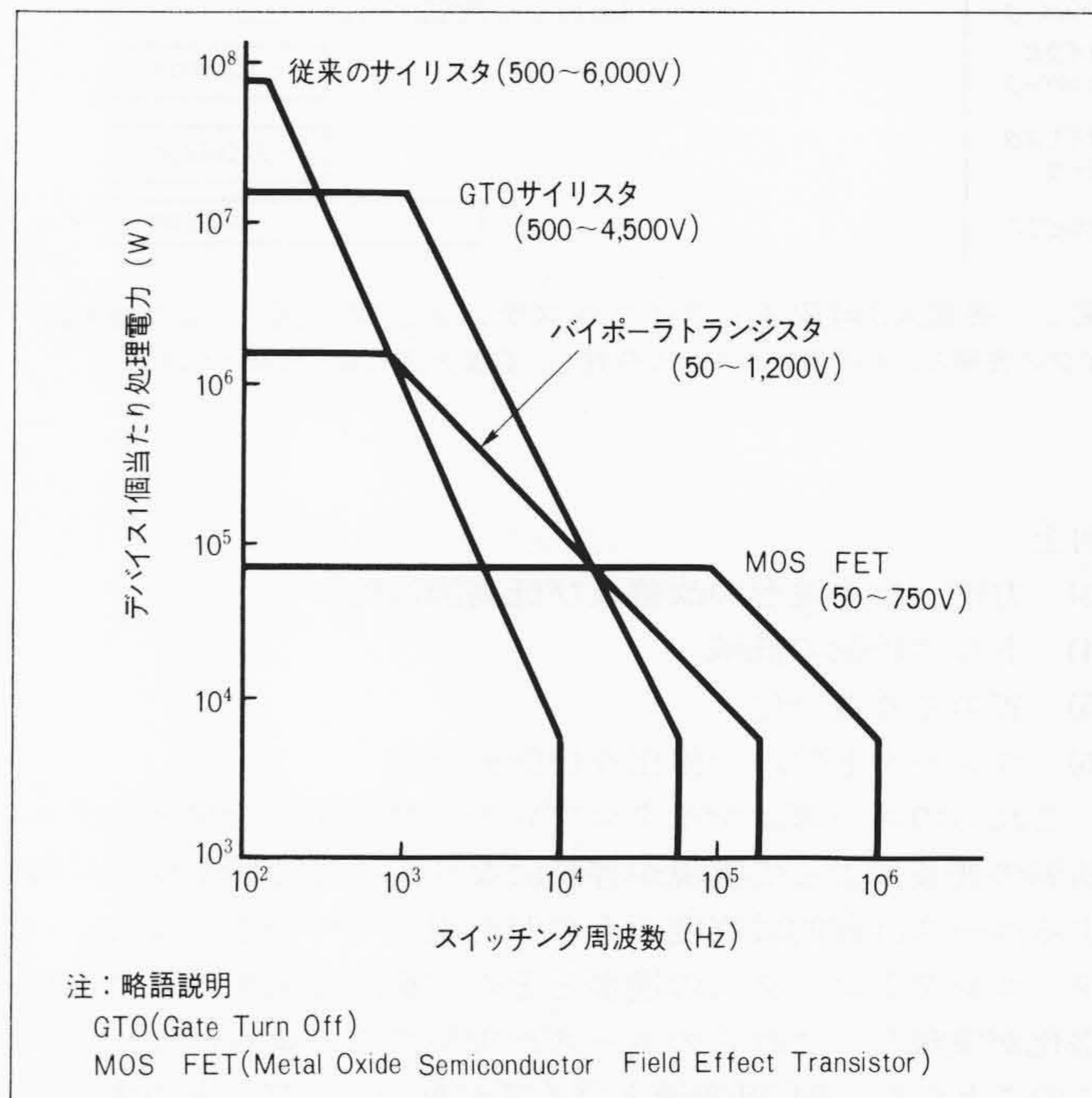


図1 各種パワーデバイスの適用範囲 パワーデバイスの処理できる電力とスイッチング周波数の関係を示した。

れている高性能を必要とする用途にもACドライブが採用され、丈夫な構造、ブラシレス構造などからの保守性の改善、更に直流機では整流限界などから実現できなかった高速応答が実現できるようになっている。

2.2 ドライブシステムへのニーズ

電動機、電力変換機及び制御装置で構成されるAC可変速ドライブシステムは、次のようなニーズがある。

- (1) 高性能化、高機能化
- (2) RAS(Reliability, Availability, Serviceability)機能の

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所日立研究所 工学博士 *** 日立製作所機電事業本部

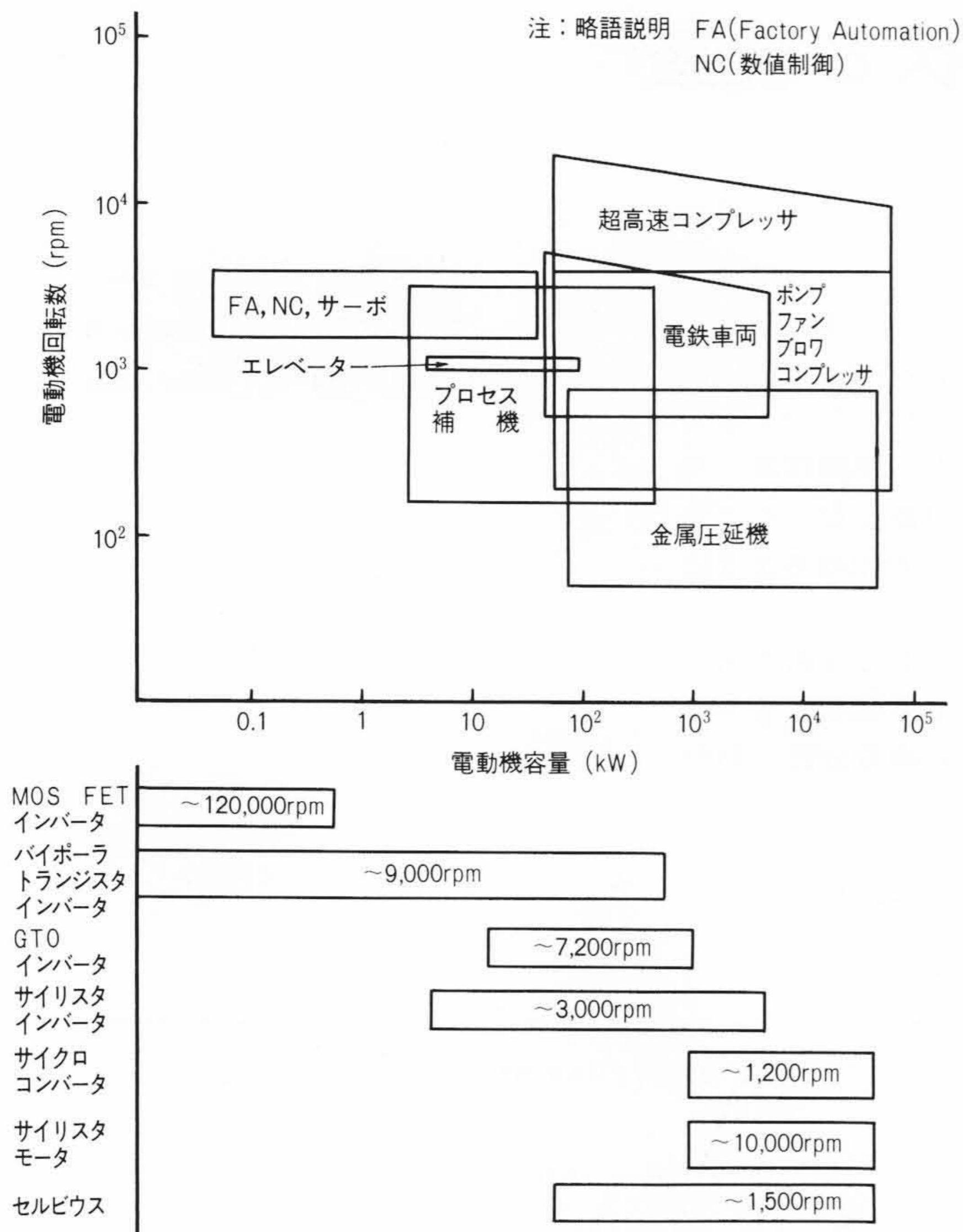


図2 各種AC可変速ドライブシステムの適用範囲 AC可変速ドライブの各種方式が適用される主な分野を、容量と回転数の関係で示した。

向上

- (3) 力率、出力波形の改善及び低高調波化
- (4) トルク脈動の低減
- (5) 省エネルギー化
- (6) コンパクト化、一体化及び低価格化

これらのニーズはマイクロプロセッサを用いたデジタル制御の普及によって実現が容易になり、特に性能や機能に関するニーズは質的に高度のものが実現しつつある。また、パワーエレクトロニクスの進歩とその広範囲な適用により低価格化が実現し、これらのニーズが実現できるようになった。このことから、AC可変速ドライブが数千キロワットの大容量システムから数ワットのサーボシステムまで広範囲に拡大適用されている。

3 ACドライブ技術

3.1 PWMコンバータ・インバータ

PWM(Pulse Width Modulation)制御とは、コンバータ又はインバータ主回路のパワーデバイスをチョッピングすることによって、入出力波形を制御する技術で、パワートランジスタやGTOサイリスタなどの自己消弧素子の性能向上と、マイクロコンピュータの進歩によって理想的制御ができるようになった。

すなわち、入力交流電源の場合は、コンバータの入力電流が高調波の含まれない基本波正弦波で、かつ力率は特に無効電力制御を目的とするもの以外では1であることが理想的であり、インバータでは出力電圧、電流がやはり高調波の含まれない可変周波数の正弦波であることが理想的である。

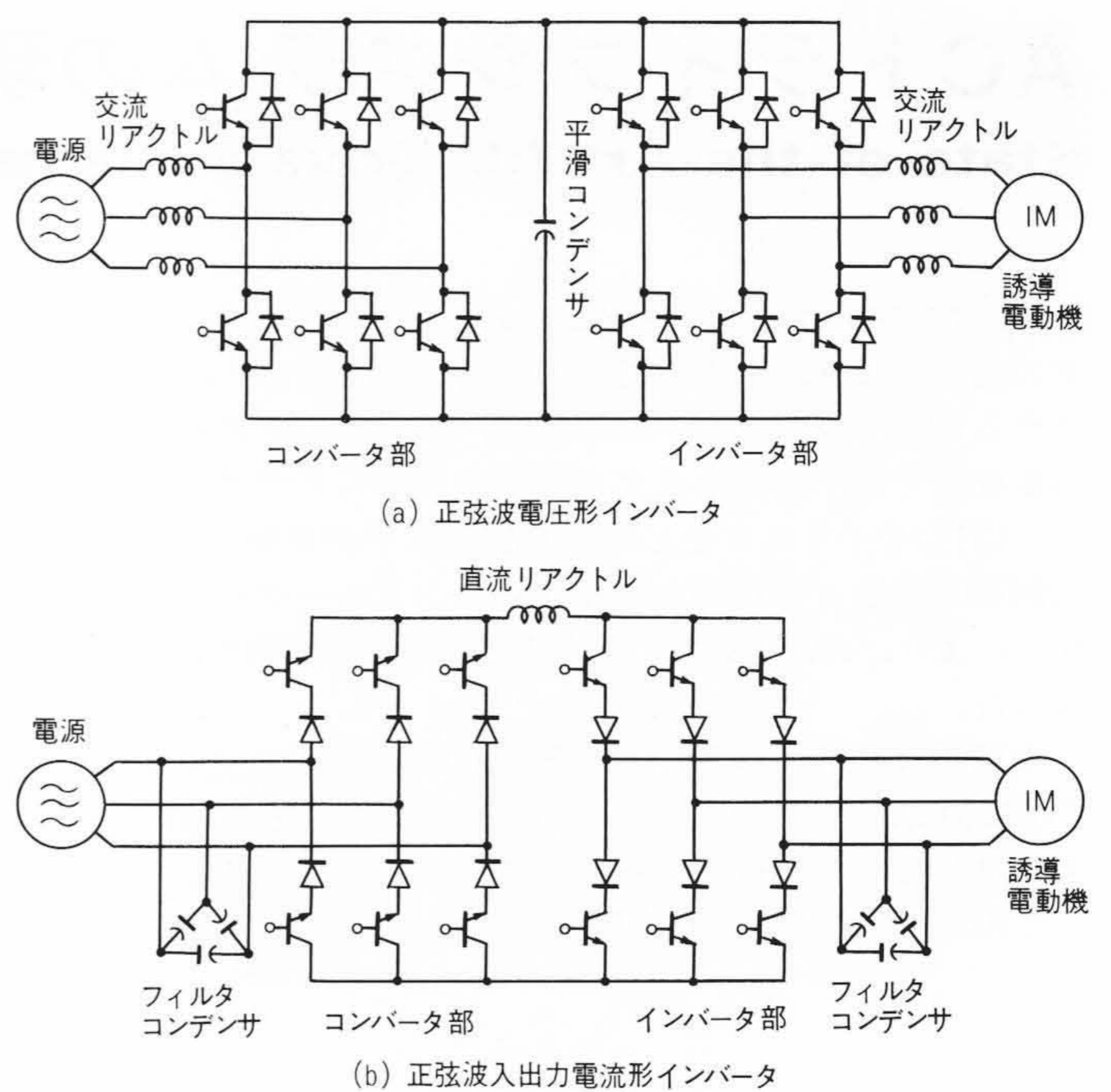


図3 PWMインバータの主回路方式 電圧形の実績が多いが、最近では電流形も実用化が進んでいる。

そのため、パワーデバイスのチョッピング周波数はできるだけ高くすることが望ましく、最近では小容量のものは騒音の低減にも有利な20kHz以上が、中・大容量のものでも2~3kHzが採用されるようになり、PWM波形の制御には8~16ビットの高速マイクロコンピュータの適用が一般化した。

PWMインバータの主回路方式としては、図3に示すように電源として電圧源とするか、電流源を用いるかにより電圧形と電流形がある。電圧形は入力側コンバータが電力回生機能のない、単なる整流器でもよいこと、パワーデバイスの逆耐圧がなくてもよいこと、入力側コンバータが電圧源であるため、これを複数のインバータで共用することもできること、など使いやすい要因があり、日立製作所でも汎用インバータから電気鉄道、一般産業用大容量インバータに至るまで多数の実績¹⁾がある。

一方、電流形は入力側コンバータの電力回生機能があるが、逆阻止機能のあるパワーデバイスが必要なことにより、電圧形に比べて複雑で実用化が遅れている。しかし、電圧形に比べて同一インバータ出力を得るのにコンバータやインバータの皮相容量が小さくて済むことや、負荷側短絡に対する保護が容易なため、パワーデバイスの電流遮断能力もあまり高なくてもよいなどの長所がある。日立製作所ではPWM波形の新制御法の採用と入出力端への小容量フィルタコンデンサの付加により、前記の理想的条件を満足するAC可変速ドライブシステムを開発²⁾し、最近エレベーター用としても実用化した³⁾。今後、一般産業用の中・大容量のシステムにも適用されていくものと期待している。

3.2 ベクトル制御

ベクトル制御は誘導電動機電流の磁束発生成分とトルク発生成分を、それぞれ目的に応じて独立に、すなわち非干渉的に制御することによって、直流電動機と同等以上の速応性と広範囲可変速度などを実現しようとする技術である。

ベクトル制御を行なうには、電動機の磁束ベクトルの位相を基準にして、運転のための所要の磁束発生成分とトルク発

生成成分のベクトルを定め、これらから合成して得られる電動機電流の基準ベクトルに実際の電動機電流が一致するように制御する方法がある。この方法では、電動機の磁束を直接検出するか、又は電動機電圧を積分して間接的に検出するなどがあり、それぞれ一長一短がある。

ベクトル制御のもう一つの方法として、電動機の回転周波数を検出し、電動機電流の所要の磁束発生成分とトルク発生成分から演算した所要の滑り周波数を、電動機の回転周波数に加えたものが基準の磁束ベクトルの回転周波数であるとする、滑り周波数形がある。この方式は、滑り周波数の演算式にも電動機の二次時定数が含まれるので、特に二次抵抗の温度変化による影響を正しく補償する必要はあるが、前記の磁束検出形での磁束検出の誤差のような問題はない。

また、最近汎用性を更に高めた速度、電圧センサレス方式も開発されている⁴⁾。図4にその構成ブロック図を示す。その特徴は、電動機電流制御形(ACR: Automatic Current Regulator)の出力により、インバータに指令される周波数指令信号から電動機の回転周波数を推定する点にあり、これにより速度センサは不要となる。本方式で速度制御精度±1%、トルク制御精度±3%を実現した。また、電動機定数や慣性モーメントをベクトル制御システム自身で自動計測し、それ

を用いてオートチューニングすることによって、電動機定数や慣性モーメントの影響を受けず常に高精度のベクトル制御を行なう方式を開発した⁵⁾。これらの技術からベクトル制御はいっそう使いやすくなり、広く適用されていくものと思われる。

3.3 マイクロコンピュータ技術

AC可変速ドライブの制御は、前述のようにベクトル合成された電流を正しく制御したり、正確な滑り周波数の演算を行ったりするため、マイクロコンピュータ技術が必要である。

マイクロコンピュータの主な機能をまとめると、図5のようになる。図6に示すように汎用向けはCPU(中央処理装置)及び周辺LSIがそれぞれ高度化していく方向にあるが、専用向けにはシングルチップ形の進歩が著しく、いわゆるASICs(Application Specific ICs: 特定用途向けIC)として電動機制御の分野でもそれに最適な機能を内蔵したものが開発されていく方向にある⁶⁾。電動機制御用としてのマイクロプロセッサは、CPUのほかに、CPUサポート処理、メモリ数値演算処理、パラレル処理、シリアル処理、パルス処理などの機能を内蔵したものが広く使用されている。今後は図5の各機能がモジュール化され、ユーザーニーズに応じた最適なマイクロコンピュータがフレキシブルに提供されるようになるものと期待される。

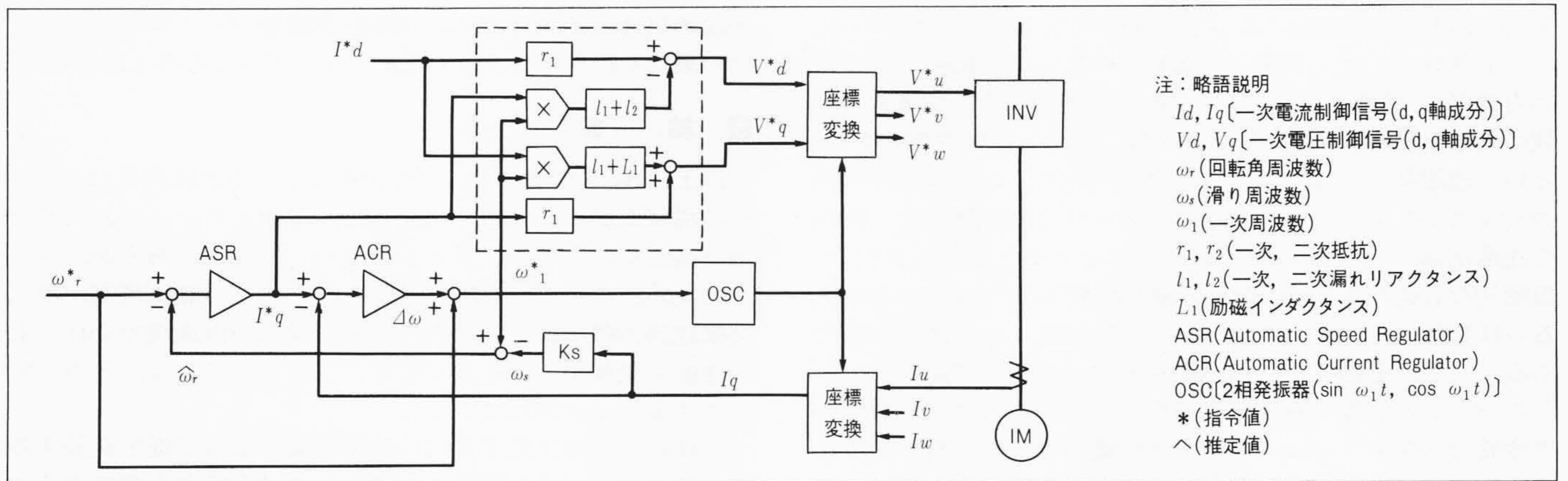


図4 速度、電圧センサレスベクトル制御システム基本構成 速度センサ、電圧センサを用いることなく、高精度ベクトル制御を実現している。

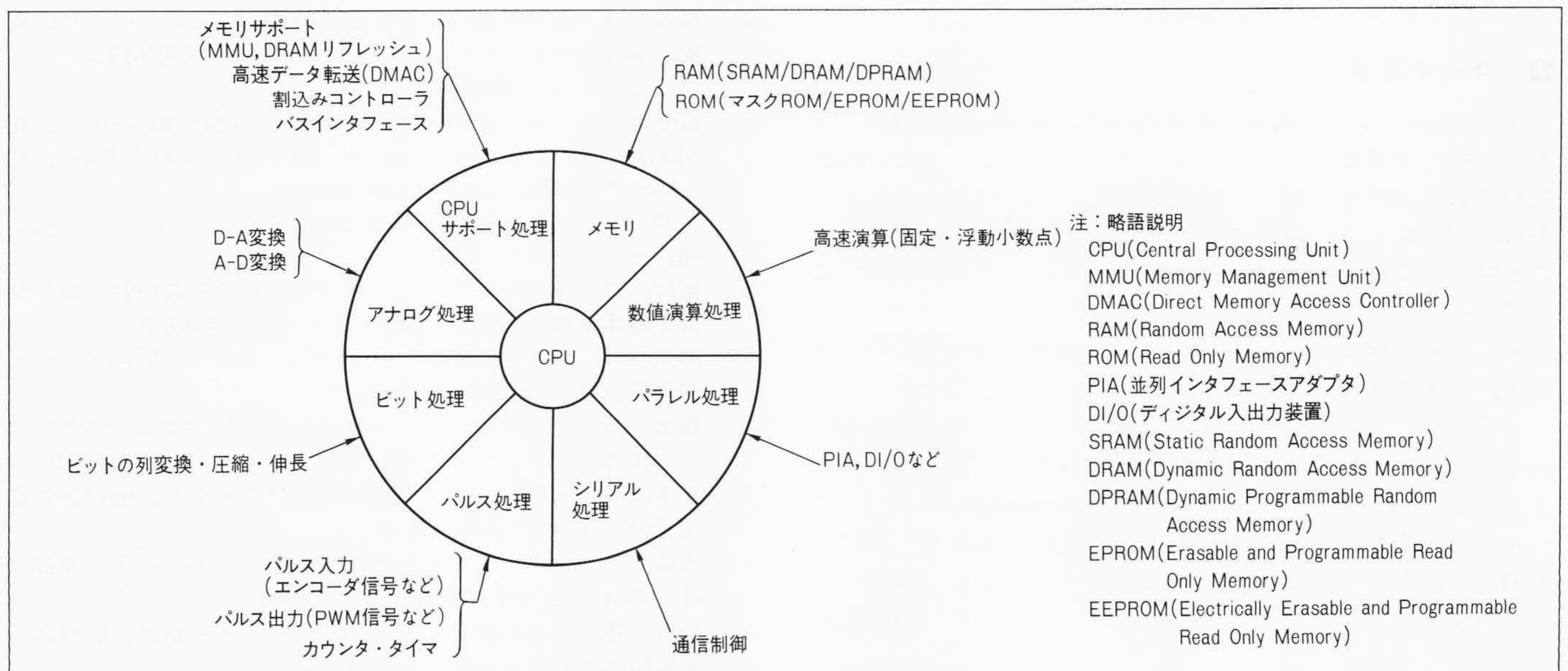


図5 マイクロコンピュータの主な機能 個々の機能をモジュール化しておき、ユーザーニーズに対応してCPUと組み合わせ、最適なマイクロコンピュータを実現していく方向にある。

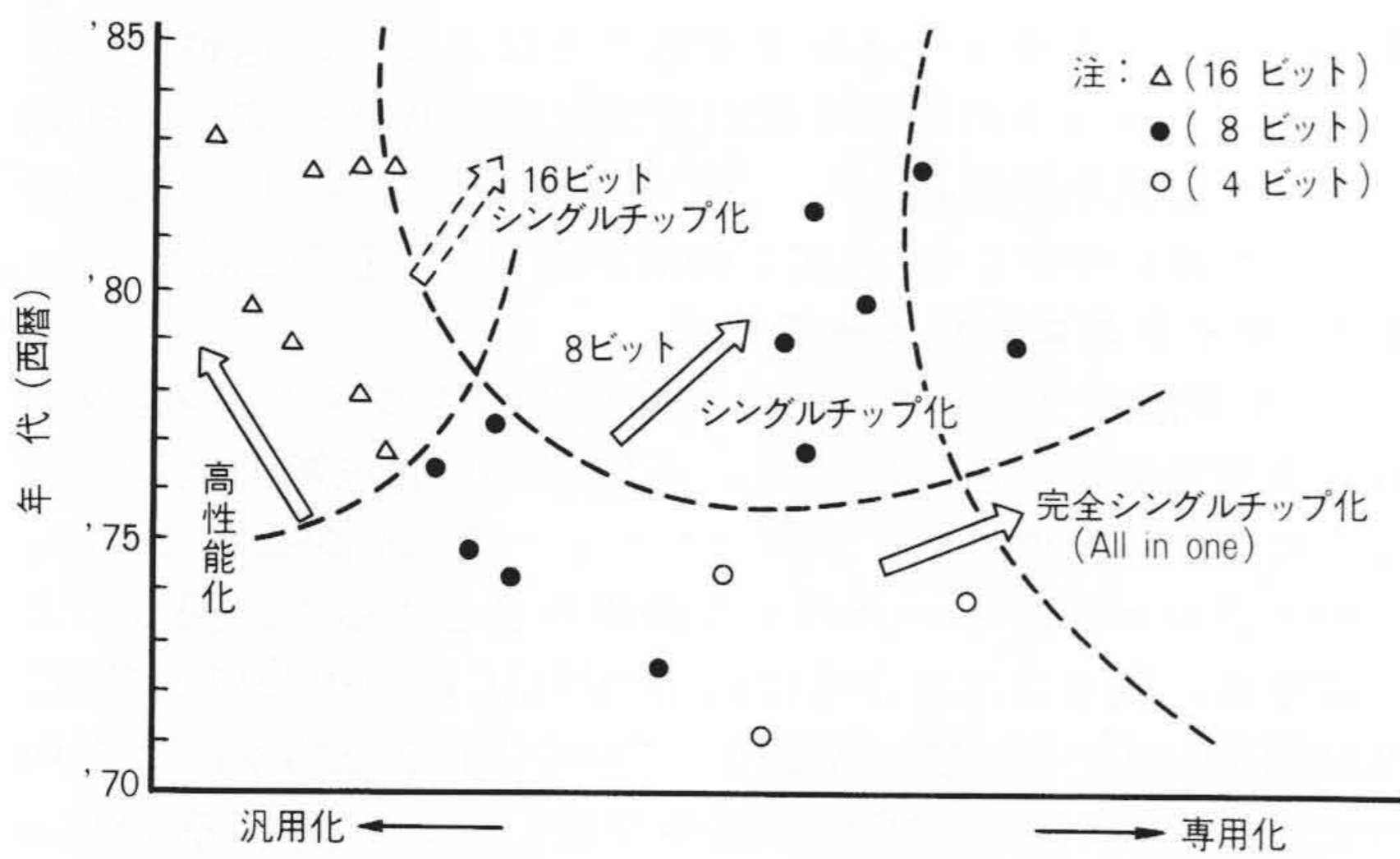


図6 マイクロコンピュータの動向 CPUと必要な周辺機能を内蔵したシングルチップ形の進歩が著しい。

3.4 現代制御理論

AC可変速ドライブシステムに要求される性能や機能を達成するには、交流電動機のもつ非直線性、各変数相互の干渉性などから、従来の線型古典制御だけでは困難がある。そのため、いわゆる現代制御理論が用いられているが、これらの関係を表1に示した。ハードウェア、ソフトウェア上の各種の障害が、現代制御理論に基づく各種の方法で克服できている。

日立製作所で最近開発したXYテーブルの振動抑制位置決め方式⁷⁾は、状態フィードバック制御の適用により位置決め時間の大幅な短縮を可能にした例である。また、定格速度の0.1%という速度制御演算サンプリング周期内に、エンコーダの出力パルスがフィードバックされないような極低速でも、円滑な速度制御を実現した例⁹⁾や、トルクセンサを用いることなく振動的な負荷のある軸振動を抑制した例⁹⁾は、いずれも速度あるいは負荷トルクをオブザーバにより推定する手法の効果である。一方、駆動特性に強い非線形性を示す多関節形ロボットのハンドの位置や姿勢を高精度に制御するには、パラメータ変動の影響を受けにくいモデル規範適応制御が有力な手法である¹⁰⁾。

これらの各種の手法は、適用する目的と対象の制約条件にもよるが、種々組み合わせて用いることにより、AC可変速ドライブの高度化に更に威力を発揮するであろう。

4 今後の展望

AC可変速ドライブ技術の高度化には、電動機、パワーデバイス、電力変換器、センサ、マイクロコンピュータ及び制御技術の各要素技術の新しい展開が相互にインパクトを与えながら、バランスよく進歩することが不可欠の条件である。その意味で、各要素技術の今後の動向は大いに注目されるところである。

まず、電動機としてはACドライブの特徴を生かすための高速化、高応答化がいつそう追求されていくことになろう。

パワーデバイスは大容量化、高周波化、モジュール化がいつそう進むとともに、制御電力を極力小さくする方向が強まると予想され、MOS(Metal Oxide Semiconductor)とバイポーラを複合化したデバイスの実用化が進むであろう。更に将来的には、論理回路などを同一モジュール内あるいは同一チップ内に内蔵したインテリジェントパワーデバイスの模索がなされるであろう。

これらのパワーデバイスを活用したコンバータやインバータは、スイッチング周波数を高めることによって、電氣的、

表1 AC可変速ドライブへの現代制御理論の適用 ハードウェア、ソフトウェア上の障害に対して、現代制御理論に基づく種々の手法が提案されている(各項目は必ずしも1対1に対応はしない)。

ACドライブの課題	課題に対するハードウェア、ソフトウェア上の障害	現代制御理論に基づく手法
●高応答	●パワーデバイスのスイッチング周波数	●有限整定応答制御 ●2自由度制御
●高精度	●センサの分解能 ●マイクロコンピュータの処理速度	●オブザーバ ●モデル規範適応制御
●安定性向上	●パラメータ変動 ●非線形性	●最適制御 ●可変構造制御
●易調整	●センシング困難 ●多変数の干渉	●オートチューニング ●非干渉制御
●性能向上	●多様な外乱	●学習制御

騒音的にも性能が改善され、小容量の分野ではモジュール化が追求されていくものと思われる。

センサ関係では、高分解能のエンコーダやトルクセンサが制御の高度化に重要な役割を果たしていくことになる。

高性能センサの出力信号処理あるいはセンサレスの場合は、高度な推定演算のために、更に各種の現代制御理論に基づく手法の具体的適用のために、高速・高機能マイクロコンピュータの果たす役割はますます大きくなっていくものと思われる。

5 結 言

以上、AC可変速ドライブでの中心となる技術内容についてその現状と展望について紹介した。ドライブシステムへの課題は高性能、高効率、低トルクリプルなどがあるが、マイクロコンピュータの技術と、PWM、ベクトル制御理論が現代制御理論の積極的導入とあいまって従来の直流機のそれ以上の性能を発揮することができるようになっており、その適用がますます拡大されている。

これらの技術は産学共同の研究開発によって進歩発展するものであり、今後も関係者の絶大な指導と協力を要請する次第である。

参考文献

- 1) 新井, 外: 西武鉄道山口線新交通用VVVFインバータ制御装置, 第22回鉄道におけるサイバネティックス利用国内シンポジウム論文集 423(昭60-11)
- 2) Hombu, et al.: A Current Source GTO Inverter with Sinusoidal Inputs and Outputs, Conf. Rec. IEEE IAS 1985 Annal Meeting, 1033~1039(1985-10)
- 3) 三井, 外: 正弦波インバータ制御高速エレベーター, 日立評論, 68, 6, 495~500(昭61-6)
- 4) 奥山, 外: 速度センサレス・ベクトル制御の制御特性, 電気学会半導体電力変換研究会資料 SPC-86-21(昭61-2)
- 5) 藤本, 外: ベクトル制御のオートチューニング, 電気学会回転機研究会資料 RM85-26(昭60-7)
- 6) 森永: モータ制御からみたマイコンの現状と動向, '86小形モータ技術シンポジウム予稿集, B1-1-1~7(昭和61-3)
- 7) 正木, 外: XYテーブルの振動抑制位置決め方式, 昭和60年電気学会全国大会 588(昭60-4)
- 8) 大前, 外: マイコン式電動機速度制御の低速制御性能改善方法, 第24回SICE学術講演会 1113(昭60-7)
- 9) 松田, 外: 高速負荷トルクオブザーバによる軸振動抑制制御, 昭和61年電気学会全国大会 678(昭61-4)
- 10) 久保, 外: ロボットの適応形軌跡制御方式の基礎検討, 第27回自動制御連合講演会 2024(昭59-11)