

パワーエレクトロニクスによる モータ制御特集

パワーエレクトロニクスによるモータ制御の動向	59
産業用サイリスタモータ	64
車両用サイリスタモータ	72
可変周波インバータによるモートル制御	78
誘導電動機のブラシレスセルビウス制御	86
直流電動機のエレクトロニクス制御	92

パワーエレクトロニクスによるモータ制御の動向

General Aspects of Motor Speed Control by Power Electronics

In the field of speed control for both DC and induction motors the voltage control method using thyristors has been extensively used with its advantage in improving the efficiency and performance of variable speed driving equipment. To be added to this will be a frequency control method for brushless AC motors which employs thyristors and features freedom from maintenance. The article describes the present status and future prospects of motor speed control systems.

立川昭三* *Shôzô Tatekawa*
 村上啓一* *Keiichi Murakami*
 渡辺 博** *Hiroshi Watanabe*
 堀 孝正*** *Takamasa Hori*

1 緒 言

速度制御を中心とするモータ制御は、常に古くて新しい問題である。変速方法の原理的なものはきわめて古くから知られていながら実用性という面は、その時代の電気工学上の技術レベルに大きく制約され、かつ新しく開かれるという性格を持っている。すなわち、モータ入力電力の制御技術と、フィードバック制御(自動制御)技術との二つの技術発展にささえられ次々と新しい展開がなされてきた。

ちなみに、昭和30年代前半には、電動発電機(M-G)に代わって水銀整流器、回転増幅機に代わって磁気増幅器が登場し、圧延機や抄紙機、電気機関車などに、一時代を築いた。さらに後半に入ると、水銀整流器に代わってサイリスタが出現し、磁気増幅器もトランジスタ演算増幅器に置き換えられ、半導体技術によるモータ制御というエポックが画され昭和40年代前

半の隆盛を見るに至った。図1および図2に示すようにこれらの経過を見ると、たとえば、直流機の制御では高効率と高性能さらに静止化、保守手数の低減などが図られ、交流機の制御では、クレーマ方式、セルビウス方式のように、原理的には古くから知られていながら、経済的な制約から、長く実用化されなかった方式が半導体技術の発展により、その制約を解かれたものなどがある。

さて、昭和40年代後半に入り、サイリスタ応用技術の新展開および制御のIC(集積回路)化ならびにデジタル化などにより一般に、パワーエレクトロニクスと呼ばれる新しいモータ制御の局面が出現した。ここには、技術的には、主として経済的制約から普及をはばまれていた入力電源周波数を制御する方法にウエートが置かれるようになってきたことおよびブラ

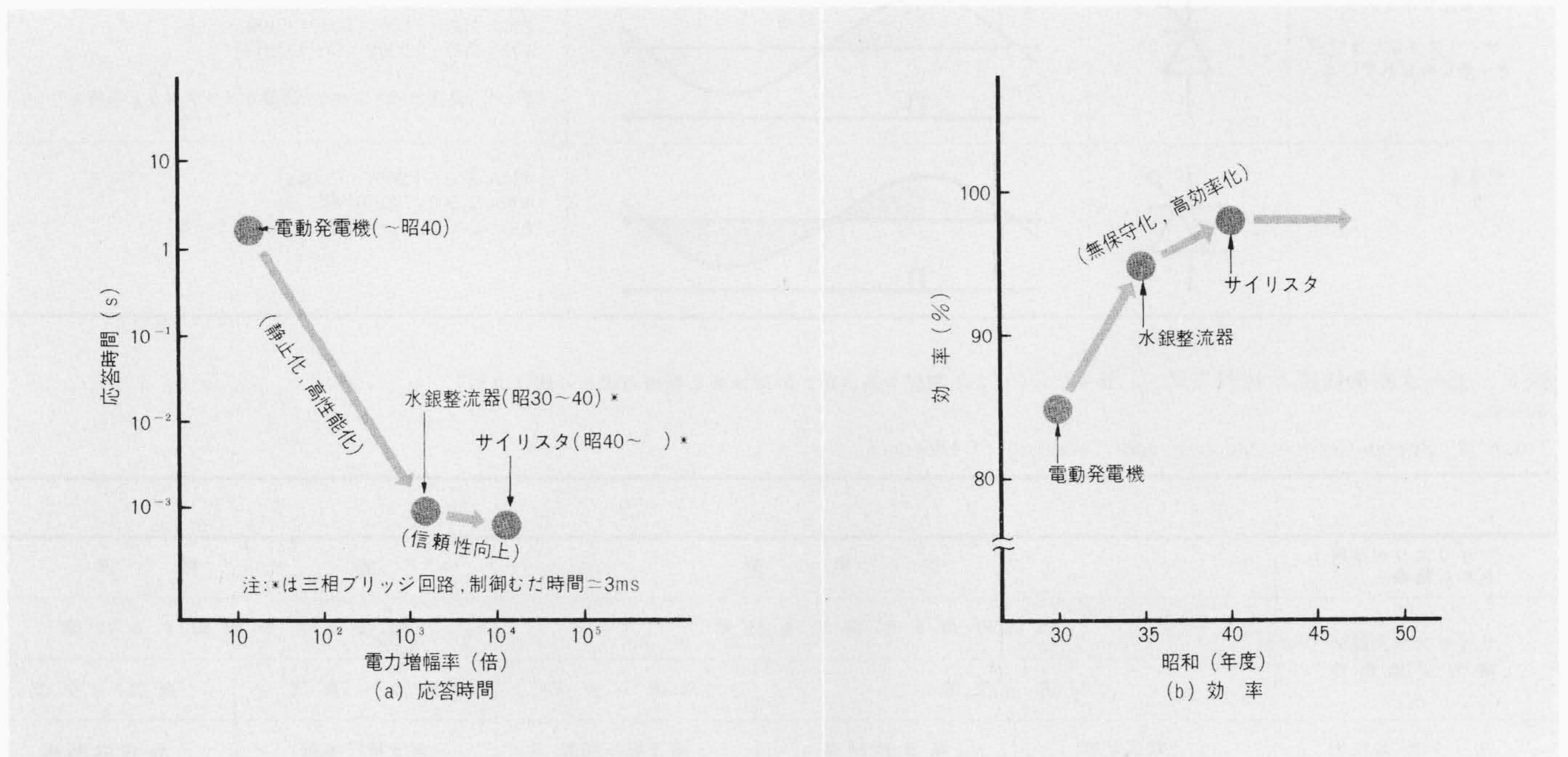


図1 モータ制御用大容量パワー変換器の応答時間と効率の推移 パワー変換器が、電動発電機から水銀整流器へ、さらにサイリスタへと推移した過程およびその推移を促した要因を示す。

Fig. 1 Transition of Response Time and Efficiency of Power Source for Motor Control

* 日立製作所機電事業本部産業技術本部 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所日立研究所 工学博士

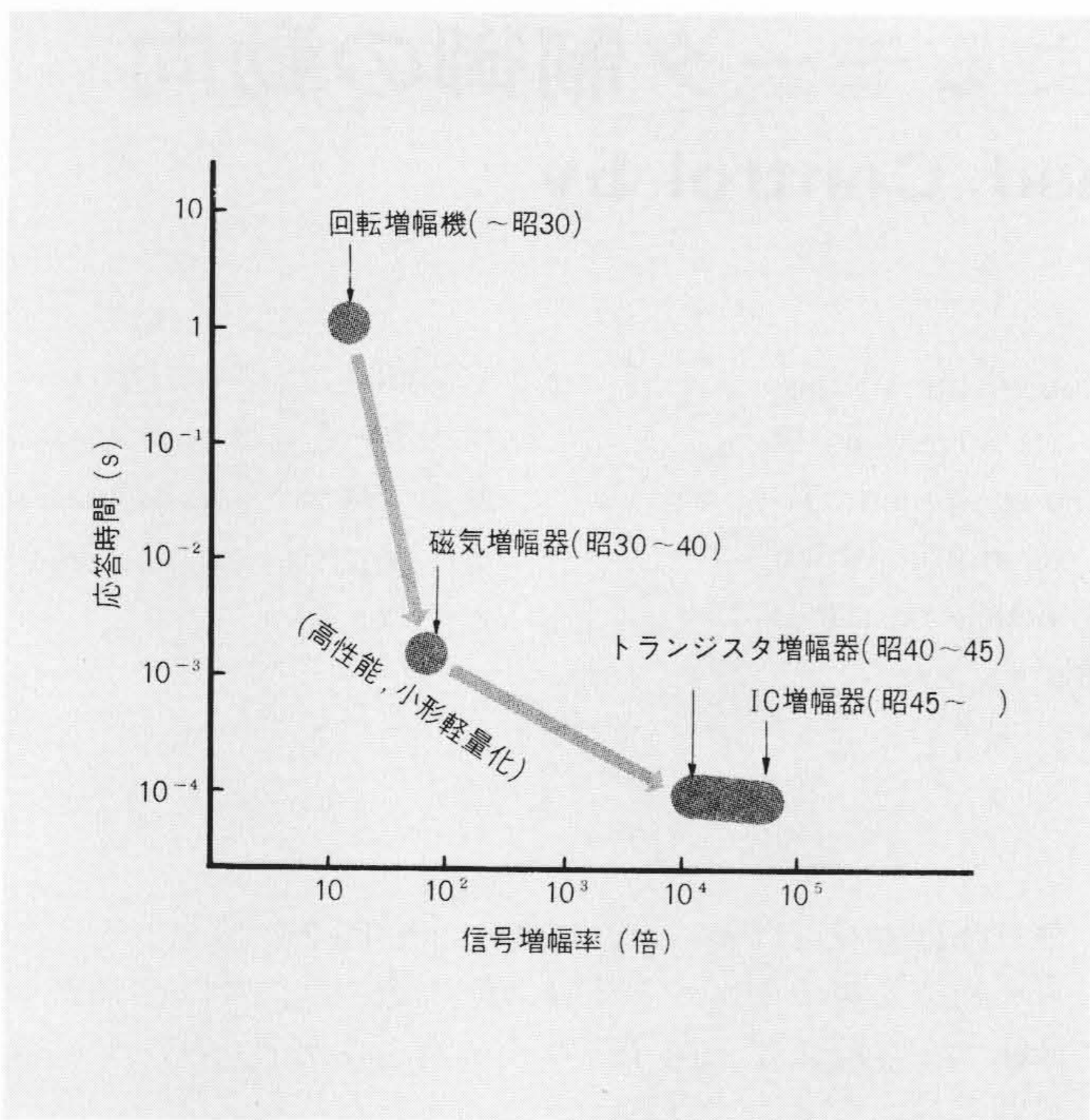


図2 モータ制御用信号増幅器の応答時間の推移 信号増幅器が高性能、小形軽量化をめざして進歩してきた過程を示す。

Fig. 2 Transition of Response Time of Signal Amplifier for Motor Control

シレス化などモータ自体の構造改良により、時代の要請であるメンテナンスフリー化が図られるようになったことはその特徴である。

本論では、パワーエレクトロニクスによるモータ制御の現況と今後の動向について概説する。

2 パワーエレクトロニクスによるモータ制御

三つ以上のジャンクションを持ち、ゲート制御あるいは過電圧によって、スイッチング的に電力を調整できる半導体素子はサイリスタと呼ばれ、表1に示すものがパワーエレクトロニクスに多数使用されている。

日立製作所では、サイリスタとその応用に関する研究を昭和35年から続けており、圧延機、鉄道車両用、その他一般産業用サイリスタレオナード装置、地下鉄電車用サイリスタチョップ装置、ポンプ用サイリスタセルビウス装置、紡糸機用サイリスタインバータ装置などを製品化し、顧客の要請にこたえてきた。このような装置の主要技術はモータ制御技術である。

表2は、モータ制御技術とモータ制御方式との関係を示すものである。サイリスタを交流電源に接続した場合、サイリスタの点弧時点を制御できるが、消弧時点は主回路の電圧、電流状態により自動的に決まる。一方、直流電源に接続した場合、強制的に消弧しないかぎり電流は持続するので、消弧時点の制御が必要になる。表から明らかのように、モータ制御技術は(1)交流電圧制御、(2)周波数制御、(3)直流電圧制御に大別でき、これらの

表1 パワーエレクトロニクスに使用されるサイリスタの代表例(日立製作所におけるもの)

逆阻止サイリスタと逆導通サイリスタがパワーエレクトロニクスに使用される。

Table 1 Typical Capacity of Thyristor Used in the Field of Power-Electronics

名称	シンボル	動作	サイリスタ素子の实用代表定格 ()内は形式
逆阻止サイリスタ (サイリスタまたはSCRと一般に呼ばれているもの)			16A 200~1,000V (ZCSR16) 250A 200~1,600V (CJ04,CJ02) 400A 200~2,500V (CH11,CH13) その他、高速サイリスタ、小容量サイリスタなど各種あり。
逆導通サイリスタ			400A 800~1,200V (CH04V) 400A 2,500V (CF01V) (主としてチョップ制御に使用されている)

表2 モータ制御技術と制御方式 サイリスタによる電圧や周波数の制御技術と制御方式との結びつきを示す。

Table 2 Speed Control Method and Technics of Motor

		サイリスタ			
		交流電源		直流電源	
サイリスタ回路の電力変換動作		点弧時点を制御する技術		消弧時点を制御する技術	
		交流 → 交流	交流 → 直流	直流 → 直流	直流 → 交流
モータ制御技術		交流電圧制御	周波数制御	直流電圧制御	周波数制御
モータ制御方式	直流電動機			サイリスタレオナード	サイリスタチョップ
	誘導電動機	一次交流電圧制御	サイクロコンバータ (アシンクロ形サイリスタモータ)	サイリスタセルビウス	インバータ (AVAFによる小容量多機の並列運転 電流断続始動式 シンクロ形サイリスタモータ)
	同期電動機		サイクロコンバータ (シンクロ形サイリスタモータ)		

注: AVAF = 可変周波インバータ

各技術は、直流電動機、誘導電動機、同期電動機など各種モータの速度制御方式として使用される。

3 パワーエレクトロニクスによるモータ制御の動向

3.1 制御の現状

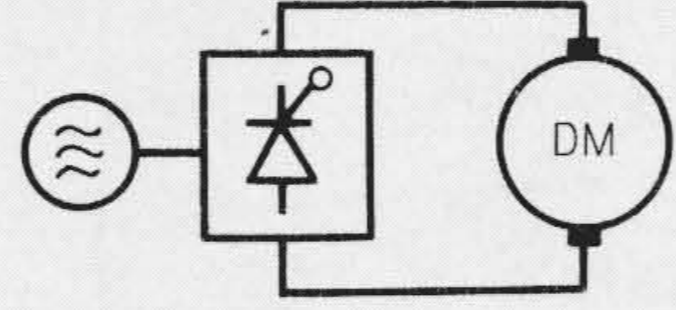
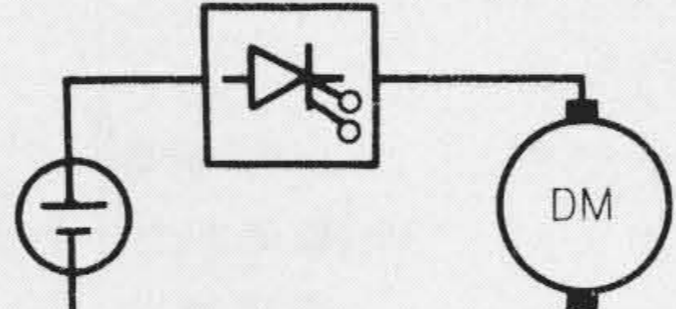
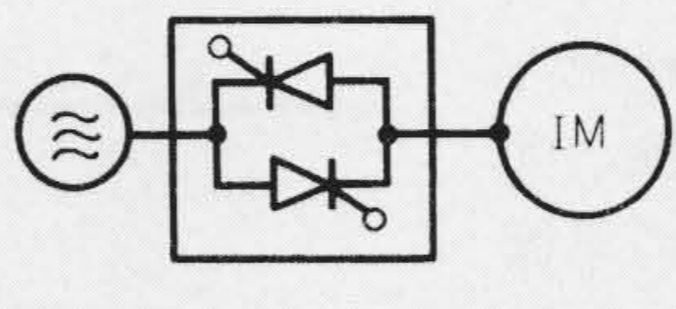
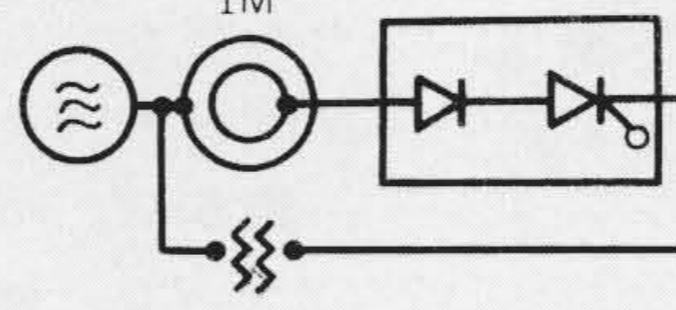
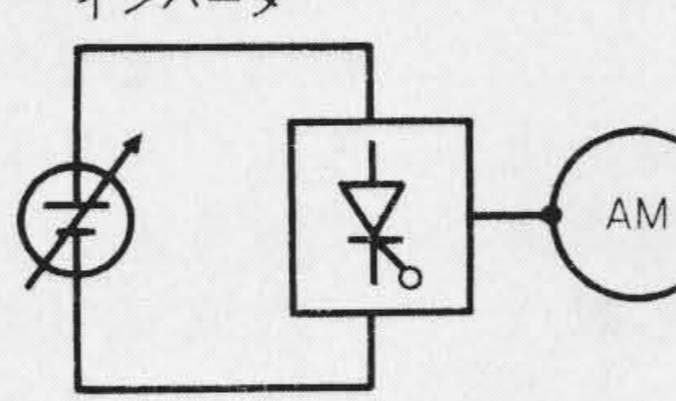
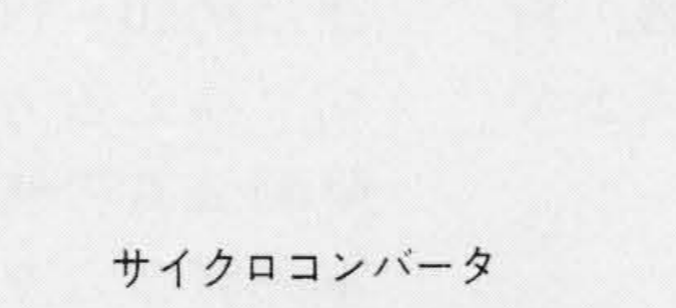
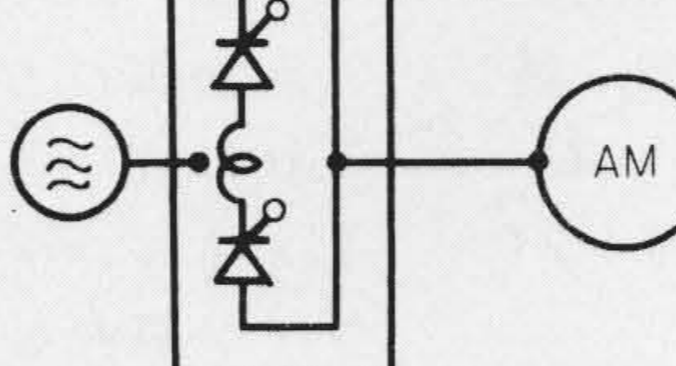
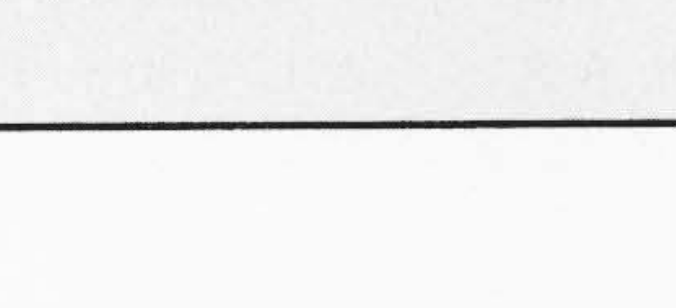
表3は、現在実用されているモータ制御方式の代表的なものを示すものである。

直流電動機は一般産業分野で古くから可変速電動機として多数使用されている。制御方式として電機子電圧制御が主と

して採用されており、高速域において定出力が要求される場合には界磁制御が併用される。電圧を制御するために交流電源から給電されるサイリスタ整流回路が用いられるのがサイリスタレオナード方式であり、直流電源から給電されるチョップ回路が用いられるのがサイリスタチョップ方式である。前者は、単に可変速が要求される用途のみならず高性能、高速応性が要求される用途にまで広く使用されている。また後者は、逆導通サイリスタの出現によって脚光を浴びるようになった方式であり、地下鉄用電車の制御方式として注目され

表3 各種モータ制御方式とその代表的な適用分野 モータ制御方式について、今までの制御方式と今後の制御方式ならびに各方式の適用を示す。

Table 3 Typical Application of Speed Control Method of DC Motor and AC Motor

被制御電動機	モータ制御技術	速度制御方式	主回路単線結線図	代表的な適用分野および用途
従来の制御方式 直流電動機 (DM)	電圧制御	サイリスタレオナード		広範囲の速度制御が必要とされる分野 (たとえば、圧延機、巻上機、押出機、工作機などの駆動に)
		サイリスタチョップ		電源が直流である地下鉄電車、産業用車両 (フォークリフト) など
		一次交流電圧制御		クレーン、電極棒昇降など、正逆転がひんばんにくり返される用途
		サイリスタセルビウス		ポンプ、ファンなど同期速度近傍でのわずかな速度制御によって、負荷が大幅に調整できる用途
今後の制御方式 交流電動機 (AM)	周波数制御	インバータ		小容量多機の並列運転が必要とされる分野 (たとえば、ポットモータ、テーブルローラ、汎用小物の揃(せん)速、遠心分離機)
		サイクロコンバータ		大容量低速ポンプ、ファン、その他一般産業用 (アシンクロ形サイリスタモータ)
		インバータ		高速精密小容量機の揃速制御が必要とされる分野 (たとえば、ポットモータ、遠心分離機) 揚水発電電動機の始動用(シンクロ形サイリスタモータ) 一般産業用(シンクロ形サイリスタモータ)
		サイクロコンバータ		圧延機、車両、工作機、ポンプ、ファン、その他一般産業用 (シンクロ形サイリスタモータ)
誘導電動機 (IM)				
同期電動機 (SM)				

るようになった。将来、一般産業分野へも適用が期待されている。

交流電動機には誘導電動機と同期電動機がある。誘導電動機では低速度になるほど二次回路にはいってくる入力（二次すべり入力）が増加するので、主として同期速度近傍での狭い範囲での速度調整が必要とされる用途に適している。一次電圧制御は、クレーン、電気炉電極棒の昇降など、正逆転がひんばんに必要とされる用途に、セルビウス制御はわずかな速度調整でトルクが大きく変わる負荷、たとえばポンプ、ファンなどの制御に使用される。周波数制御では、周波数と一次印加電圧との比がほぼ一定値に保持されるので、二次すべり入力は低速度でも増加しない。したがって、低速度から高速度まで連続的に速度制御を必要とする用途、たとえばテープローラの制御に適している。

同期電動機は、給電電圧の周波数を変えることにより速度が調整できるが、印加する周波数が完全に回転周波数に同期していなければ脱調するので用途が限定されている。しかし、印加周波数と回転周波数が一致する特長を活用して、精密な定速度運転を必要とする用途、たとえば、紡糸機用ポットモータとして多数使用されている。一方、回転周波数を積極的に検出し、その信号を周波数指令に利用したのが無整流子電動機である。これは、直流電動機の整流子とブラシが持つ作用をサイリスタと界磁位置検出器（分配器）に代行させ無整流子化した電動機とみなされ、通常、サイリスタモータと呼ばれることが多いが、これは広義に解釈すれば、整流子のない可変速電動機という意味で、サイリスタ周波数変換器と誘導電動機や同期電動機を組み合わせた可変速電動機の総称ともいえる。従来、サイリスタ周波数変換器は小容量多機の並列運転に採用されていたが、最近では、大(中)容量機の単機運転にも採用されるようになってきた。その場合、直流電動機と同様な特性が期待できるので、無整流子電動機をサイリスタモータと総称し、誘導電動機を使用する場合をアシンクロ形サイリスタモータ、同期電動機を使用する場合をシンクロ形サイリスタモータと呼ぶことにしている。

3.2 モータ制御にサイリスタを適用する目的

モータ制御にサイリスタが広く使用されているが、その目的とするところは、モータを含めた装置全体の(1)性能および機能の向上、(2)効率の向上、(3)小形化および軽量化、(4)保守点検の簡略化、(5)設備空間の節約および設備費の軽減などであると考えられる。これらが複雑に組み合わせられて実際の製品にサイリスタが使用されているが、表4はそれぞれについて代表例を示すものである。

サイリスタが実用化された当初には、電動発電機を静止化装置に置き換えて性能向上が、抵抗制御を電圧制御に置き換えて効率向上が図られた。現在、それに加えて省力化の観点から、装置の無保守化が要請されている。この要請にこたえたのがサイリスタモータである。また、従来製品の改善、新機能を付加した新製品の開発はいつの時代でも重要なことであり、時期を問わず間断なく続けられている。

3.3 今後のモータ制御

小容量機については、多機並列運転にインバータが採用されており、単機運転では、直流電動機の電機子電圧制御、誘導電動機の一次電圧制御(PCモートル)が採用されている。今後、インバータの価格が安くなれば、単機運転にもインバータが採用されるようになるであろう。

大(中)容量機については、今までに使用されているのは直流電動機のサイリスタレオナードと誘導電動機のサイリスタ

表4 サイリスタをモータ制御に適用する目的 サイリスタがモータ制御に、何を目的に適用されるかを示す。

Table 4 How Are Thyristors Applied to Motor Speed Control

サイリスタの特長	モータ制御にサイリスタを適用する目的	過去(従来)の方式と現在(今後)の方式との関連
無接点 高効率	性能、機能の向上	水銀整流器 → (電圧制御) → サイリスタレオナード 電動発電機 → (周波数制御) → {インバータ サイクロコンバータ}
	効率の向上	可変抵抗 → (電圧制御) → {サイリスタチョップ サイリスタセルビウス}
小形、軽量 高速応性 高信頼性	保守点検の簡略化による省力(メンテナンスフリー化)	ブラシ付電動機、(ブラシレス化) → ブラシレス交流電動機(サイリスタモータ) 整流子電動機、(無整流子化) 揚水発電電動機 の直結電動機始動 → (静止化) → サイリスタモータ始動 (無接触化)
	新機能の創造	(サイリスタ装置の) 大容量化 → 可変速大形回転機 (サイリスタ装置の) 小形化 → 電気自動車 (高周波インバータ) → 超高速回転 (リニアサイリスタモータ) → 超高速推進

セルビウスなどの電圧制御である。これらは、今後どのような制御方式に置き換わっていくであろうか。

表5は、可変速大容量回転機が使用されている代表的分野について、従来から使用されている方式とこれから採用される方式とを示すものである。

圧延機の制御には多数の可変速直流電動機が使用されている。特に、圧延機主機駆動には最高の制御性能が要求されているが、ローラテーブル、サイドガイド、ロール圧下などの補機に期待される性能には大きな幅があり、性能がそれほど要求されないものもある。したがって、最高の制御性能が要求される大容量主機駆動に関しては、今後も当分の間直流電動機が使用されるであろう。また、主機補機については、制御性能が要求されないものにはサイリスタモータが採用されるであろう。

水道用、抄紙機用ポンプの制御には、巻線形誘導電動機のサイリスタセルビウスが使用されている。ポンプの可変速範囲は約50~100%なので、抵抗器で始動した後セルビウスに切り換える方式が採用されている。最近、顧客から、ポンプ駆動装置の無保守化の要請があり、その第一段階として誘導電動機2台を直結し、電動機のスリップリングとブラシをなくしたブラシレスセルビウス制御を世界で初めて実用化した。

わが国にも各地に高速自動車道路が建設されるようになり、これに伴いトンネル内における換気が問題となりつつある。トンネルは保守管理者から遠く離れた場所にあるため、換気ファン駆動装置には特に無故障、無保守が要求される。

これらポンプおよびファンに対する顧客の要請にそうものとしてサイリスタモータがある。今後はこの方面にもサイリ

表5 可変速大容量機の制御方式 可変速運転が要求される大容量機の今後の制御方式を示す。

Table 5 Speed Control Method of Large Capacity Motor, Present and Future

製品名(おもな用途)	代表的な回転機容量(MW)	可変速範囲(rpm)	従来の制御方式	今後の制御方式
圧延機(製鉄)	~10(1スタンド)	0~600	サイリスタレオナード(DM)	主機には当分、従来方式が採用されよう。
ポンプ(水道機)	~5	500~1,000	サイリスタセルビウス(IM)	サイリスタモータ, もしくはブラシレスセルビウス
ファン(トンネルセメント)	~1		極数切換(IM)	
キルン(セメント)	~1	1~10(低速)	IM+ギヤ減速	サイリスタモータ
揚水発電電動機	300	始動	直結電動機による始動	発電電動機をサイリスタモータとして始動
超高速列車	100(1編成)	0~500km/h	———	リニアサイリスタモータ

注: DM=直流電動機, IM=誘導電動機

スタモータが多数使用されるであろう。

揚水発電電動機の始動には、直結電動機始動法が採用されている。直結電動機が各発電電動機に直結されているので、その分だけ建屋構造が大きくなること、直結電動機は始動時にしか使用されないこと、保守が必要なことなどが弱点であった。サイリスタが実用されるようになってからすでに十年余を経過し、信頼性に対する評価も増大してきたことから、モータ制御技術を適用して、直結電動機なしで、発電電動機をサイリスタモータとして始動する方法が脚光を浴びるようになってきた。この始動法の利点は、従来方法に比較し、保守点検が容易になり、設備空間が節約でき、運転効率が向上できることである。

セメントキルンは低速で運転される。低速運転には電動機の極数を増す方法があるが、これにも限度があり、ギヤ減速が併用される。減速をギヤなしで行なうためにサイリスタモータの適用が考えられる。サイリスタモータを採用すれば、ギヤなしでモータを負荷に直結できるので設備空間が節約でき、運転効率も上げることができる。

表5に、これからの制御方式について示したが、その基本となる考え方は、省力を目的とした無保守化である。

3.4 モータ制御における無保守化の方向

モータ制御における無保守化(メンテナンスフリー)の方向として下記のものがある。

(1) 無整流子化, ブラシレス化

無保守化可能なモータはブラシレス交流電動機である。その制御方法には、周波数制御とブラシレスセルビウス制御がある。誘導電動機の一次電圧制御は効率が悪いので、適用は小容量機に限られる。

(2) 主回路切換え, 開閉回路の無接点化

主回路切換え, 開閉回路はモータ制御に多数使用されている。たとえば、直流電動機の電機子電圧の方向を切り換え正逆転するために、誘導電動機の相回転方向を切り換え制動運転するために、二次抵抗切換えに、また無効電力を補償するためのコンデンサ入切に、過電流からモータや変換器を保護するための電流しゃ断など制御用および保護用として多数使用されている。

このような回路は、小信号で大電力の開閉が可能なサイリスタ回路で置き換えることができる。また、サイリスタ利用技術(特にチョップ技術)の進歩とともに、サイリスタは主回路の無接点开閉器としてさらに広く使用されるようになるであろう。

(3) 制御回路の無接点化

アナログ制御回路の無接点化は、半導体増幅回路の採用により完了したといえる。現在ではリニアIC(半導体集積回路)が使用されており、制御回路は小形、軽量化され信頼性も向上した。一方、リレーについては過去10年来無接点化の努力が続けられてきたが、ICの出現によりハードウェア的にはシーケンサ回路全体の無接点化が図られ、ソフトウェア的にはシーケンサ、小形計算機などによるプログラム化が図られるようになってきた。

以上説明したように、制御回路の無接点化が続けられてきたが、今や、モータ自身のブラシレス化が実現し、両者を有機的に結合したモータシステム全体の無保守化が名実ともに実現したといえる。

3.5 モータ制御の問題点

現在、パワーエレクトロニクスによる輝かしい「モータ制御の時代」が展開されつつあるが、パワーエレクトロニクス特有の注意すべきいくつかの問題も存する。いずれも、従来のサイリスタレオナード、サイリスタセルビウスにおいて経験されていることではあるが、以下に付言する。

(1) サイリスタ装置から発生する整流回路特有の高調波が電源に流れこむ結果、電源系統にサージを与えるおそれがある。また高調波に基づく変圧器や電動機の磁気音や、通信誘導障害が問題となるが、これらは適切な高調波フィルタの設置によりこれを防止することができる。

(2) 可変速モータが大形化しているため、事故や故障による停止は直接生産量の低下、機能の低下につながり、被害はきわめて大きくなっていく。この点、保護装置や、バックアップ装置も含めた信頼性の向上が重要な問題である。しかしこのような問題は、幸いにして近年エレクトロニクス機器の信頼性確保の手法が発展しているため、合理的な信頼度設計により、安全が確保されている。

4 結 言

以上、パワーエレクトロニクスによるモータ制御の現状と今後の動向について論述した。

従来、開発段階であった大容量交流機の周波数制御や、各種のブラシレス方式などの新しいモータ制御が、今や実用化の段階を迎えており、今後の発展が期待されている。

終わりにのぞみ、顧客各位のいっそうのご支援ならびにご指導をお願い申しあげる次第である。