

# パワーエレクトロニクスによる電動機制御の展望

## General View of Motor Speed Control by Power Electronics

パワーエレクトロニクス技術の進歩は、省力、省エネルギー、信頼性向上、高性能化などのニーズを背景にして、電動機の制御分野で技術革新をもたらしている。すなわち、交流電動機の始動、停止、速度制御を信頼性高くしかも効率よく行なったり、直流電動機の弱点である整流子とブラシを取り除いたりすることが実現されている。

この論文では、マイクロコンピュータを用いたDDC制御による制御性能の向上、ベクトル制御による交流電動機の応用範囲拡大の可能性とともに、GTOなどの新機能サイリスタ素子による装置の簡略化、光点弧方式による信頼性の向上など、現状及び将来技術について展望した。

鈴木敏孝\* *Suzuki Toshitaka*  
村上啓一\*\* *Murakami Keiichi*  
斉藤奎二\*\*\* *Saito Keiji*  
川上直衛\*\*\*\* *Kawakami Naoe*  
小池俊男\*\*\*\*\* *Koike Toshio*

### 1 緒言

電動機制御にサイリスタが用いられるようになってから、既に約20年を経過している。サイリスタなどパワー素子の大容量化、高速化、信頼性の向上及び低価格化に並行して、半導体制御デバイスの機能向上と多様化も目覚ましく、この両者がパワーエレクトロニクスによる電動機制御技術発展の原動力となって、これまで複雑さや経済性などの点から具体化できなかった制御方式を実用可能なものにしていく。

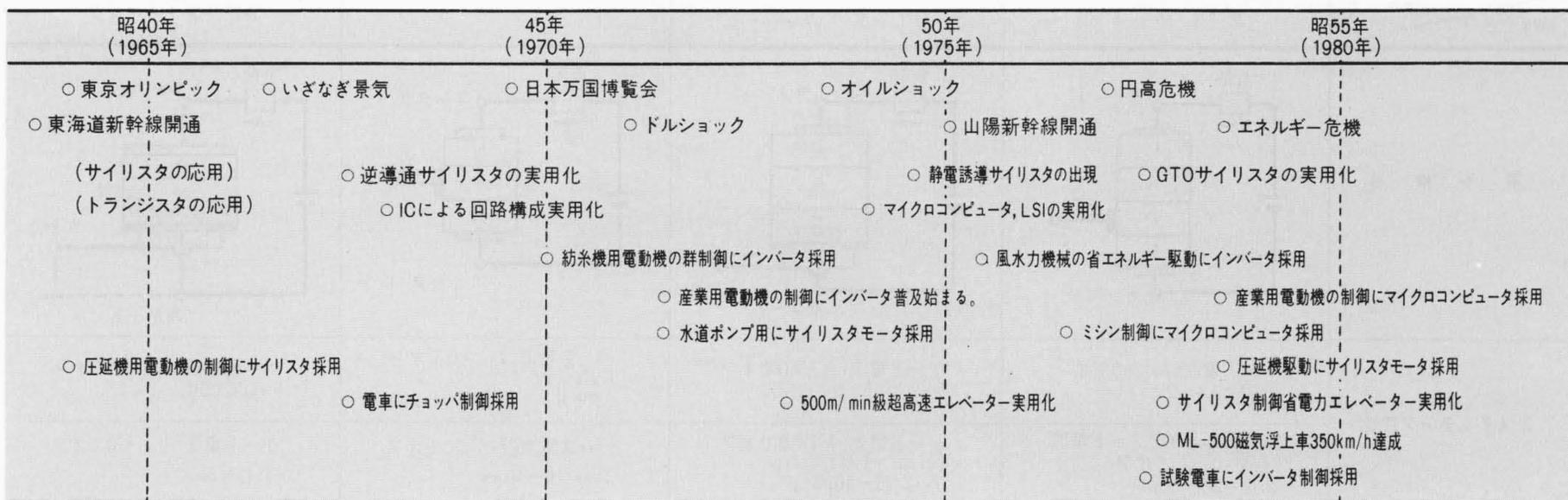
電動機制御の基本は速度制御であるが、図1はおよそ過去15年を振り返って電動機制御に関する社会のニーズと、これにこたえる技術開発の推移を見直したものである。この図からもうかがえるように、電動機制御に関する最近のニーズは用途によって違いがあり、対応技術の多様化を求められているものの、大綱は図2に示すように整理できると思われる。要は多様な機能をもつ電動機制御システムを経済的に提供することがメーカーにとって当然の責務であり、更に省エネルギー化、保守の省力化が求められており、特に最近のエネルギー価格の高騰ぶりから言って、省エネルギー・電動機制御は今後よりいっそう重要視されるであろう。

この論文は、これらのニーズと新しいデバイスとして注目すべきGTO(Gate Turn Off:ゲートターンオフ)サイリスタやマイクロコンピュータなどの可能性を踏まえて、パワーエレクトロニクスによる電動機制御技術の現状と将来について展望を試みたものである。

### 2 最近のデバイス

電動機に供給する電力を制御する素子はサイリスタが中心であるが、最近では自己消弧性のある素子としてGTOサイリスタや静電誘導サイリスタが注目されている。表1に、これら各種電力用スイッチング素子の特性と動向をまとめて示す。

現在のところ、駆動すべき電動機の容量が数百キロワット程度以上では、サイリスタ以外の素子は考えにくい。しかし、サイリスタはサイクロコンバータに用いる場合のように電源転流が行なわれるときは別として、電流しゃ断のために強制転流回路が必要であり、その容量はサイリスタのターンオフ時間にほぼ比例する。したがって、装置の小形化にはターンオフ時間の短縮、言い換えるとサイリスタの高速化が望まし



注：略語説明 GTO(Gate Turn Off)

図1 電動機制御に関するニーズの動向 過去15年を振り返って、主な出来事と電動機制御に関するニーズの動向をおおまかに示した。

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

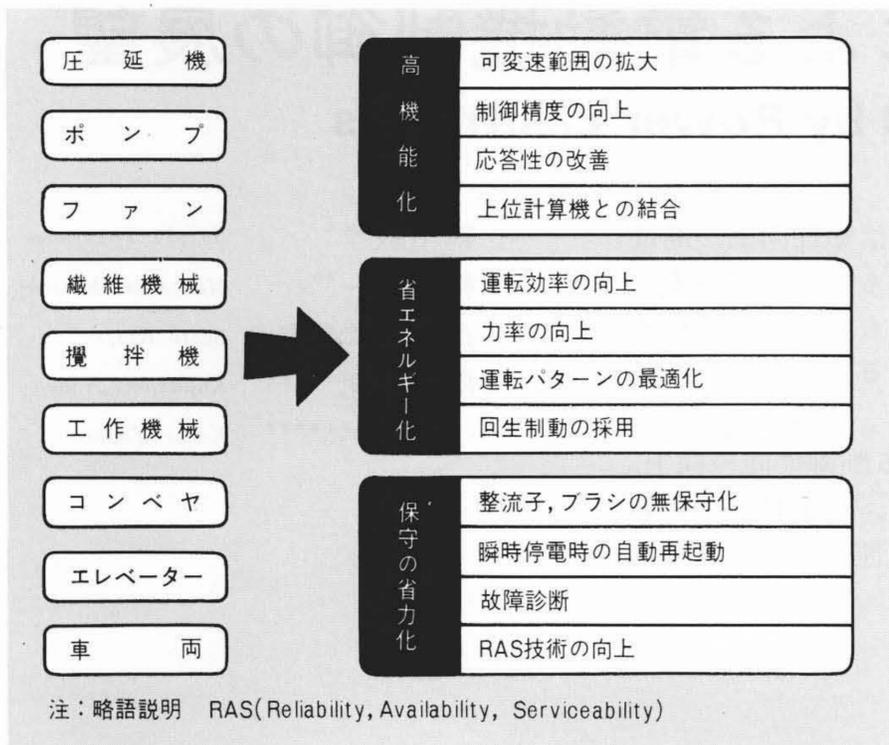


図2 電動機制御に対するニーズ 電動機の代表的な用途とこの制御に対するニーズを、三つの観点からまとめて示した。

い開発の方向である。

次に、自己消弧機能をもつGTOサイリスタの大容量化が進み、中容量電動機の駆動に適用できるようになった。GTOサイリスタは、ゲート電流の制御によってアノード電流を自由に断続できる特長があり、回路の大幅な簡略化が図れる。スイッチング時間も比較的短くできるために、20kHzぐらいの周波数でも使え、今後の用途拡大が期待できる素子である。このほか、自己消弧性のある素子としてはトランジスタと静電誘導サイリスタがあるが、トランジスタは低電圧で数キロワット程度以下の小容量電動機の制御に適し、静電誘導サイリスタは比較的高圧、高速の中容量電動機用として注目すべき素子であろう。なお、点弧方式では従来のパルストランス

による点弧方式一本やりから、主回路と制御回路間の絶縁性と耐ノイズ性に優れると期待される光点弧方式に移行する可能性も指摘され、光直接点弧サイリスタの開発も報告されている。発光ダイオードの寿命はかつて数千時間であったが、最近では10万時間を超えつつあり、発光ダイオードの寿命が向上すると、点弧方式として一般化する可能性も考えられる。

制御用デバイスに目を向けると、昭和45年ごろからIC増幅器を先頭に、電動機制御用としてICが急速に採用されるようになり、今日ではトランジスタやダイオードなど、ディスクリットなデバイスだけで構成された制御回路はまずないと言えるほどになっている。最近では、LSIやマイクロコンピュータのインパクトが、電動機制御に最適制御や故障診断の可能性など全く新しい考え方を導入しつつある。

### 3 電動機制御方式の動向

#### 3.1 制御方式の現状と今後の展望

各種電動機の代表的な制御方式を、まとめて表2に示す。

直流電動機は整流子とブラシ周りの保守が問題とされながら、方式の簡単さと優れた制御性能によって根強い用途がある。ブラシ材質の改良と用途に適したブラシの選択、また用途に応じた整流条件を設定するとともに、フラッシュオーバに至るような過酷な駆動条件を制御によって回避するなどの処置によって、地味ではあるがブラシ周りの保守の省力化は進んでいる。今後飛躍的な保守性の向上は無理としても、直流電動機は可変速制御の基本的な方式として存続するであろう。

誘導電動機の一次電圧制御は、構成が簡単で正・逆転も容易であるが、可変速範囲は狭く力率、効率も良くない。クレーンなど正・逆転運転頻度の多い用途、及び小容量電動機に適用されると思われる。二次電圧制御は、比較的簡単な構成で効率も悪くないが、速度制御範囲を広く取りにくい。ポンプ、ファンなどわずかな速度制御によって、大幅な負荷調整ができる用途に用いられている。最近では回転数制御範囲を広くとって、システム全体の効率を向上させる考え方から、

表1 電動機駆動用スイッチング素子の特性と動向 現在はサイリスタ、GTOサイリスタ、トランジスタが代表的な素子である。数年後には静電誘導サイリスタの登場が期待される。

特性など	サイリスタ	GTOサイリスタ	トランジスタ	静電誘導サイリスタ
1.素子構造				
2.スイッチング特性	ゲート電流( $I_G$ )>0でオン FVD=1.4~2V 外部回路よりアノード電流( $I_A$ )=0としてオフ $T_{off}$ =20~50 $\mu$ s	ゲート電流( $I_G$ )>0でオン FVD=1.5~2V ゲート電流( $I_G$ )<0でオフ ( $-I_G \approx \frac{1}{5} I_A$ ) $T_{off}$ =5~10 $\mu$ s	ベース電流( $I_B$ )>0でオン FVD $\approx$ 1V (ダーリントン接続では2V) ベース電流( $I_B$ ) $\leq$ 0でオフ $T_{off}$ =5~10 $\mu$ s	ゲート電圧( $V_G$ )=0でオン FVD $\approx$ 1.5V ゲート電圧( $V_G$ )<0でオフ $T_{off}$ $\approx$ 3 $\mu$ s
3.特徴	(1)品種、使用実績共に豊富 (2)中~大容量電動機向き (3)自己消弧能力がない。	(1)自己消弧性があり、ゲート電流の制御によりオン、オフ可能。 (2)比較的高速で約20kHzまで使用可能。 (3)中容量電動機向き	(1)ベース電流の制御によりオン、オフ自由 オン、オフの駆動簡単 (2)低電圧小容量電動機向き (3)過負荷に弱い。	(1)FVDが小さい。 (2)高圧、高速向き (3)ゲート電圧零のとき、オン状態は他の素子のオフ状態と逆
4.開発の動向	高速・大容量化	大容量化 オン、オフゲインの増大	安全動作領域の拡大	プロセス技術の向上

注：略語説明 FVD(Forward Voltage Drop：順方向電圧降下)、 $T_{off}$ (ターンオフ時間)

表2 各種電動機の代表的な制御方式 用途に応じて種々の制御方式が開発されている。このほかに特性向上の工夫も数が多い。

電動機	制御原理	制御方式	主回路結線	特徴	主な用途
1. 直流電動機 (DCM)	電圧	サイリスタレオナード		(1)制御特性, 速度範囲を最も自由に選べる。 (2)整流子, ブラシの保守を要する。	広範囲の速度制御が必要な用途…圧延機, 巻上機, 工作機など。
		サイリスタチョップ		(1)回路構成が簡単である。 (2)整流子, ブラシの保守を要する。	電源が直流である用途…電車, 電気自動車 (フォークリフト)
2. 誘導電動機 (IM)	制御	一次電圧制御		(1)回路構成が簡単である。 (2)効率, 力率が良くない。	中・小容量機の簡易制御…クレーン, 小容量ポンプ, ファンなど。
		二次電圧制御 (サイリスタセルビウス)		(1)効率, 力率が良い。 (2)回転数範囲を広くとると, 設備容量大となる。	速度制御範囲は狭いが, 高効率で負荷変化が大きい用途…ポンプ, ファンなど。
	周波数	インバータ*		(1)広範囲の速度制御, トルク制御, 4象限運転が可能で, 高効率である。 (2)回路構成がやや複雑である。	広範囲の速度制御, 4象限運転が必要な用途…テーブルローラ, ポンプ, ファン, ポットモータ, 車両など汎用。
3. 同期電動機 (SM)	制御	サイリスタモータ	サイクロコンバータ** 	(1)高応答, 精密速度制御, 4象限運転が可能で, 高効率である。 (2)単機運転に適する。	高応答性, 精密な広範囲速度制御, 4象限運転が必要な用途…圧延機, 車両, 工作機, ポンプ, ファンなど汎用。

注：\* 他にサイクロコンバータ方式あり。 \*\* 他に他励インバータ方式あり。

インバータ駆動方式やサイリスタモータに置換される傾向がある。駆動周波数の変化によって誘導電動機の色度制御を行なう方式としては、AVAF(Adjustable Voltage and Adjustable Frequency: 可変電圧・可変周波数)インバータが代表的である。駆動周波数範囲を1:10~20にとることは容易であり、大容量化には多重方式が、波形改善にはパルス幅変調方式が開発されている。いずれの方式もトルクリプルの低減効果があり、今後、誘導電動機の色度制御方式として広く普及することが予想される。GTOサイリスタの実用化が中容量電動機駆動用インバータのパルス幅変調方式の普及に大きく寄与するものと思われる。

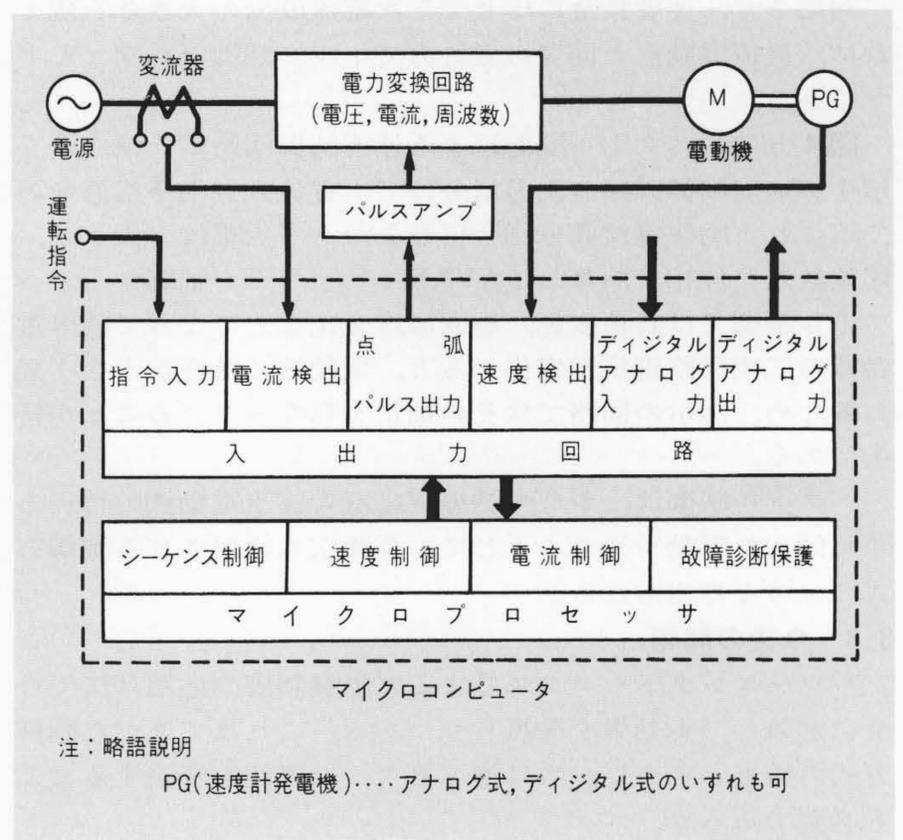
同期電動機にはインバータとサイクロコンバータが適用される。インバータの使用は小容量電動機の色度速度制御、例えば紡糸機用ポットモータの制御のような用途に適すると考えられる。中・大容量電動機の色度にはサイリスタモータが賞用されており、既に過酷な使用条件の色度機駆動用としても実用されている。サイリスタモータの特長は、直流電動機のように整流に伴う電動機の色度限界がないので、単機1万kW以上の大形電動機も製造できること、サイリスタの転流電圧が電動機の色起電圧、電源電圧により得られるので、強制転流回路を必要とせず駆動回路を簡略化できる点にある。制御性能も直流電動機並みに得られ、今後、高性能・大容量電動機の色力な駆動方式になるものと見られる。また、揚水発電電動機の色始動あるいは電動機運転用としても用いられる。

### 3.2 新しい制御方式

各種電動機の色度方式を表2にまとめて示したが、このうち、インバータ駆動方式とサイリスタモータについては、この小特集の別論文で紹介しているので、参考にされたい。ここでは、電動機の色マイクロコンピュータによる制御と、誘導電動機の色ベクトル制御の色概念について紹介しておく。

マイクロコンピュータを用いたDDC(Direct Digital Control)

trol: 直接計算制御)化電動機色度装置の色構成を図3に示す。電動機に電力を供給する電力変換回路の色構成はこれまでと変わらないが、同図に示すように色度回路と自動パルス移相器の色機能をすべてマイクロコンピュータとその周辺回路に置き換えて、デジタル化することが可能である(直流電動機に対する適用例の色詳細は、この小特集の別論文を参照)。すべての電動機色度について図3の色考えは成り立ち、色度だけで



注：略語説明 PG(速度計発電機)…アナログ式, デジタル式のいずれも可

図3 マイクロコンピュータを用いたDDC化電動機色度装置あらゆる電動機に適用できるDDC(Direct Digital Control: 直接計算制御)化色度装置の色基本構成を示した。

表3 マイクロコンピュータを用いたDDC化電動機制御装置の特徴  
これまでのアナログ方式に比べて、種々のメリットがあることを示した。

項目	マイクロコンピュータ DDC方式	アナログ方式	
1. 制御特性	速度精度	0.1%以上	0.5%程度以下
	応答性	同	同
	性能の安定性	実用上は変化しない。	周囲温度変化の影響、部品特性の経時変化の影響あり。
	保護機能	同	同
	故障診断	高度化が容易	高度化が困難
2. 信頼性	やや良	やや劣る	
3. その他	上位計算機との結合	容易に可能	情報交換に実際上限度あり。
	制御機能の向上	非線形補償、予測制御、最適制御など、高度化が可能である。	制御特性の高度化には、実際上限度がある。

なく故障診断機能のようなものも簡単に充実させることができる。表3に、現在考えられるマイクロコンピュータ制御の特徴を掲げたが、この表に示すとおりメリットが多く今後の普及が期待される。

かご形誘導電動機は堅牢でブラシレスという特長があるが、これとAVAFインバータを組み合わせる速度制御方式は、過渡応答が十分高くとれないことが欠点とされ、そのため、ポンプやファン駆動用を主体に使用されていた。しかし最近、この応答を直流電動機並みに向上できる図4に示すようなベクトル制御方式が注目されている。ベクトル制御は一言でいえば、かご形誘導電動機の一次電流の大きさ、周波数のほかに新たに位相を加えてこれら3量が所定値になるように制御し、これによってトルク特性を改善する制御方式である。誘導電動機の一次電流はよく知られているように、励磁電流成分と二次電流成分のベクトル和で与えられる。ベクトル制御では図4(a)に示すように、これら励磁電流成分と二次電流成分とをそれぞれ別個に演算、制御する。こうして、励磁電流成分を直流電動機の界磁電流に、二次電流成分を電機子電流に対応させ、速度指令に応じて二次電流成分の大きさを変えれば、直流電動機と同等の考え方でトルク制御を行なうことができる。

図4(b)に、ベクトル制御による速度制御回路の一構成例を示す。速度制御回路の出力信号は二次電流成分指令信号なので、これと励磁電流成分指令信号とから一次電流の大きさ、周波数及び位相を演算してAVAFインバータを制御する。ベクトル制御では負荷変動、周囲温度変化などによって誘導電動機の二次回路抵抗が変化すると、電動機の特性が大きく変わるため、図示の回路ではその補正を行なっていることが特徴である。

ベクトル制御は、かご形誘導電動機と直流電動機の特長を兼ね備えた駆動システムとして、今後広く使用される制御方式の一つと考えられる。

### 3.3 今後の問題

パワーエレクトロニクスによる電動機制御の応用は広く社会に定着し、実効果を発揮しつつある。これまで述べた制御方式の発展とともに、次に述べるような課題を解決することも必要であろう。

(1) 既に指摘されているとおり、サイリスタなどスイッチング素子を用いた装置から発生する高周波雑音が、変圧器や電動機の磁気音や温度上昇の源になったり、テレビジョンや通

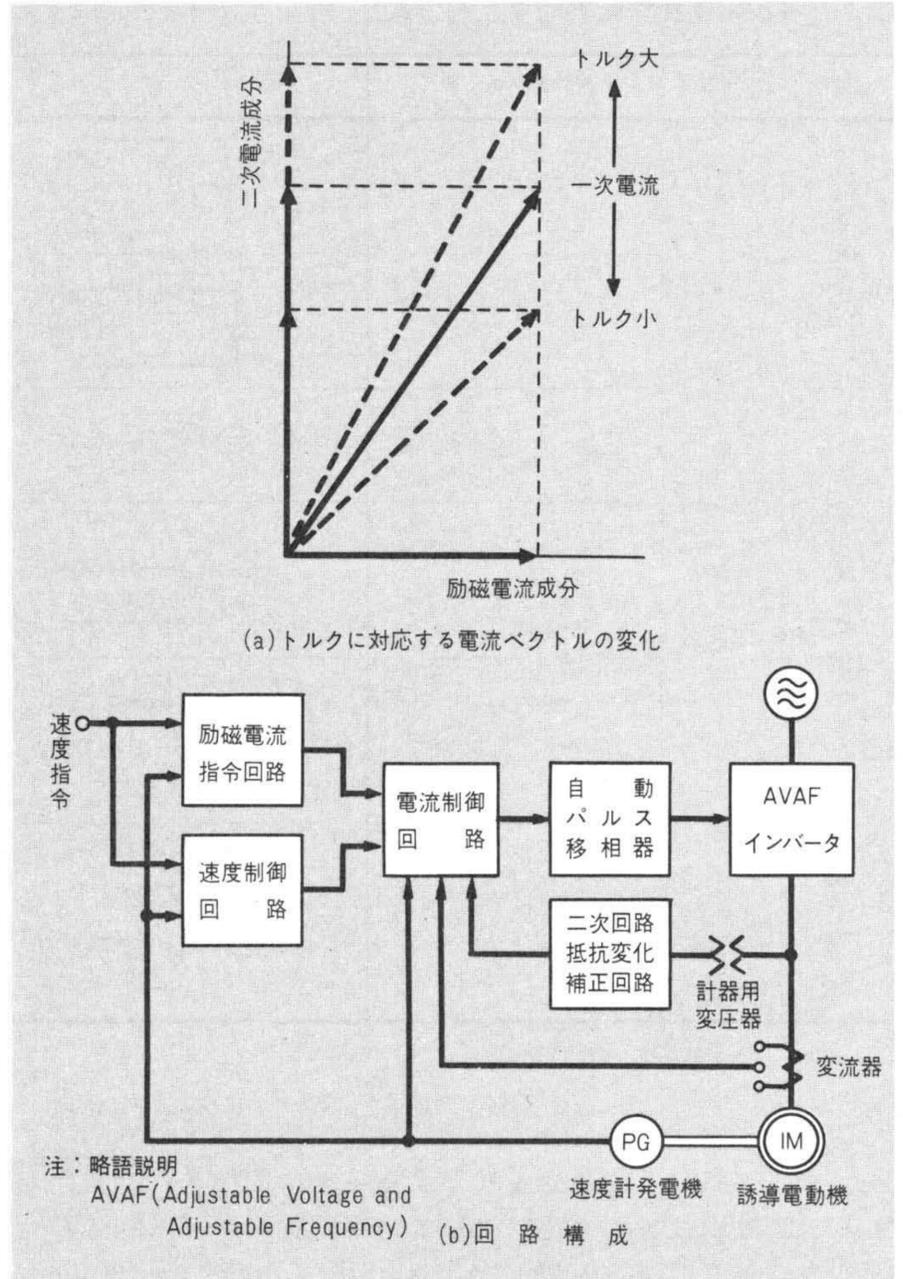


図4 誘導電動機のベクトル制御方式 ベクトル制御方式は、電圧(電流)の周波数、大きさのほかに位相を制御する点が新しい。これによって高応答が実現できる。

信機器などに雑音障害を与えることがある。これらは、適当なフィルタの挿入により解決できるが、これにとどまらずスイッチング素子を活用して力率の改善を図り、合わせて雑音除去を図ることが必要であろう。

(2) 保守の省力化を發展させて故障予知、診断を行ない、駆動装置の動作信頼度の向上を図るとともに、故障回復の迅速化を図ることが必要であろう。マイクロコンピュータの適用は制御特性の向上だけでなく、故障診断にも新しい可能性を与えるものである。

## 4 結 言

以上、パワーエレクトロニクスによる電動機制御技術の現状について展望し、その動向を簡単に論述した。これを要約すれば、GTOサイリスタやマイクロコンピュータなど、新しいデバイスの実用化により、電動機制御技術の發展、特にインバータとサイリスタモータの機能が高度かつ多様化する期待がもてることを述べ、高周波雑音除去や故障診断技術の開発が今後の課題であることを指摘した。

エネルギー危機が叫ばれる昨今、顧客のニーズに合った高効率で質の良い電動機駆動力を提供することは、メーカーとして重大な責務と考えられる。新しい技術を活用して、多様化するニーズにハードウェア、ソフトウェアの両面から期待にこたえたいと願っている。