電動機駆動用パワーエレクトロニクスの応用

Application of Power Electronics to Motor Drives

電動機駆動の分野で、パワーエレクトロニクスはディジタル化と交流機駆動 化への色彩をますます強めながら、それらの技術革新に大きく貢献している。 最近、高性能仕様の冷間圧延機主機にも交流機駆動が採用されるに至り、交流 化は容量や性能に関係なく多くの産業分野に急速に拡大している。これは、交 流電動機を直流電動機と同等以上に制御的に高性能化できるベクトル制御理論 の演算が、信頼性の高い正弦波形可変周波電源を用い、現代制御理論を多用し た高度な制御アルゴリズムをディジタル演算で高精度かつ安定に行えるように なったためである。

日立製作所は、今後更に適用拡大の進展する産業用電動機駆動の高性能化や 多機能化、また発電プラント用や化学プラント用補機の電動機式駆動化に、そ してその信頼性向上のニーズに合わせ、使い勝手のよい交流可変速駆動システ ムを開発している。 神山健三* Kenzô Kamiyama 相山 繁** Shigeru Sugiyama 守永大策*** Daisaku Morinaga 本部光幸**** Mitsuyuki Hombu

1 緒 言

パワーエレクトロニクスはパワー素子,マイクロエレクトロニクス素子及びそれらの応用と制御を包含した技術領域であるが,電動機駆動の分野はその恩恵を最も享受している。その結果,両素子のたゆまぬ技術革新によって,電動機駆動システムの重要要素である電力変換装置と制御装置は,産業界のニーズに迅速に対応することができた。すなわち,電力変換装置は自己消弧素子を用いて他励式から自励式へ,そして制御装置はマイクロプロセッサやシグナルプロセッサを用いてアナログ式からディジタル式へ移行できた。これによって,高度な制御がソフトウェアで高精度かつ安定に行えるようになり,最近では交流電動機駆動の性能が直流電動機駆動の性能をしのぐに至った10-60。

以下,電動機駆動の発展と高性能化,代表的適用例,及び 今後の動向と課題について述べる。

2 電動機駆動の発展と高性能化

パワーエレクトロニクスの電動機駆動での技術革新には、初期から現在まで目を見張るものがある^{1)~6)}。電動機駆動の性能向上の変遷を図1に示す。パワーエレクトロニクスの開幕は、昭和30年代後半に実用化されたサイリスタを用いた静止レオナードで始まった。これによって、回転式ワードレオナードは静止化され、直流電動機駆動(DCドライブ)の制御性能(精度、応答、可変速範囲など)、効率、スペース(駆動部及び制御部)などは大幅に改善した。その結果、鉄鋼、抄紙、プラスチック産業など、加工製品の量産化と高品質化は大きく前進した。

また、オイルショックを契機として昭和40年代後半から省電力化のニーズが高まり、鉄鋼や化学プラントで定速運転に用いられていた交流電動機の可変速化が推進された。ここでも、パワーエレクトロニクスの果たした役割は大きく、高信頼性で安定な可変周波電源が実用化された。これと平行して、パワートランジスタ、GTO(Gate Turn-Off)サイリスタ、IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor)などの自己消弧素子、及びそれらのモジュール化が進み、PWM (Pulse Width Modulation:パルス幅変調)制御インバータの高性能化、低価格化が大きく前進した。これによって、交流電動機の小形・軽量化と省保守化のメリットとあいまって、交流電動機の可変速駆動(ACドライブ)による省電力化はポンプ、ファン、圧縮機などはん(汎)用仕様を中心に、容量に関係なく多くの産業分野に浸透した。

また、ACドライブの適用がはん用の分野で拡大するにつれ、マイクロエレクトロニクスの進歩、特にマイクロプロセッサによる電動機のディジタル制御が昭和50年代後半に可能となった。電動機駆動のディジタル化は日立製作所が昭和56年にDCドライブで世界に先駆けて実用化したが、これがACドライブの高性能化に決定的なインパクトを与えた。すなわち、昭和40年代前半に登場したベクトル制御理論は多変数制御理論の並用を必要とし、高度な制御アルゴリズムを構成するため、アナログ演算では高精度で安定な制御が不可能であり、ソフトウェアによるディジタル演算が不可欠であった。ACドライブのディジタル化は、DCドライブのディジタル技術によって可能となりが、ベクトル制御理論の威力が多変数制御理論の並

^{*} 日立製作所大みか工場 工学博士 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所日立工場 **** 日立製作所日立研究所

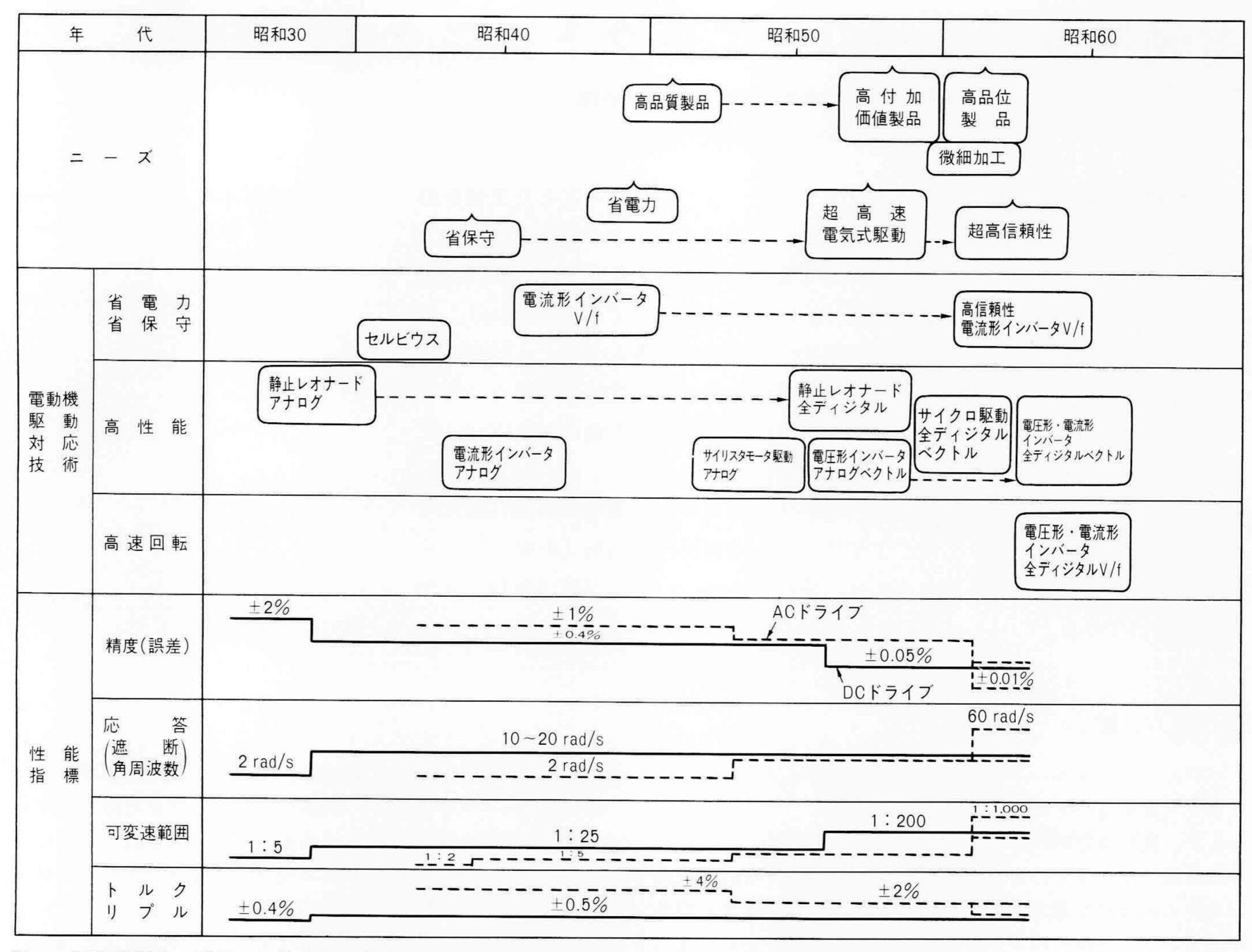


図 | 電動機駆動の発展と性能向上の変遷 新駆動方式の開発によって、性能向上に著しい進歩が見られる。

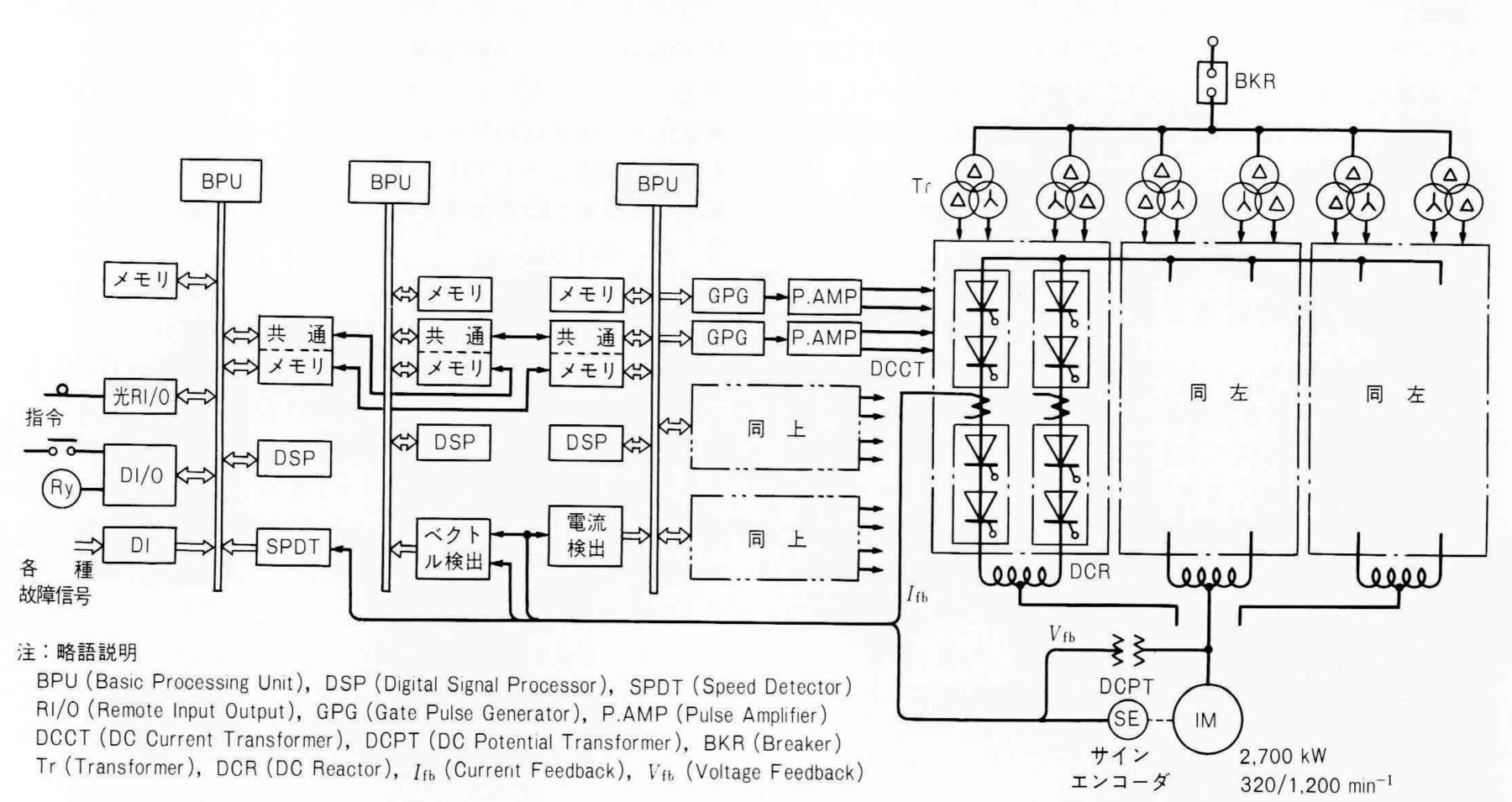


図 2 72アーム循環電流方式サイクロコンバータの制御システム構成図 共通メモリによるマルチプロセッサ及びシグナルプロセッサによって、高速演算処理を実現している。

用によって初めて発揮され、ACドライブの性能がDCドライブをしのぐに至った。これによって、ACドライブの適用範囲は飛躍的に拡大することになった。

3 電動機駆動パワーエレクトロニクスの応用

3.1 高性能仕様に対する応用

高性能仕様に対する代表的応用例として, 大容量対応の圧 延主機駆動用サイクロコンバータ, 中・小容量対応の圧延補 機駆動用PWMトランジスタインバータ, 小容量対応の試験機 駆動用PWMトランジスタインバータなどが掲げられる。高性 能仕様への要求は,(1) 高応答,(2) 高精度,(3) 広い可変速範囲, (4)低トルクリプルなどであり、その他の仕様として、(1)多様 なオプション機能, (2) 故障診断, (3) 低高調波などである。圧 延主機に適用した72アーム循環電流方式サイクロコンバータ の制御システム構成を図2に示す。制御方式としては、電流 制御方式ベクトル制御を採用している。各BPU (Basic Processing Unit)は高速演算を実現するために、DSP(Digital Signal Processor)を持ち、マルチ構成で全ディジタル制御に よって高精度, 多機能な制御仕様を実現している。本方式で の主な高性能化技術は、(1)高精度な速度検出、(2)励磁電流と トルク電流の非干渉制御,(3)負荷電流と循環電流の非干渉制 御,(4)軸振動抑制制御などである。図3は、本制御システム を適用した速度インディシャル応答である。応答時間はピー ク値で45 msであり、遮断角周波数 $\omega_c \cong 70 \text{ rad/s}$ を実現してい る。このとき、励磁電流 I_a とトルク電流 I_g との非干渉制御も効 果的に作用している。また、平滑用直流リアクトルDCR(DC Reactor) に流れる負荷電流 i_L と循環電流 I_c の間の相互干渉を 抑制し、 I_c が i_L に関係なく一定となるように制御を行いながら、

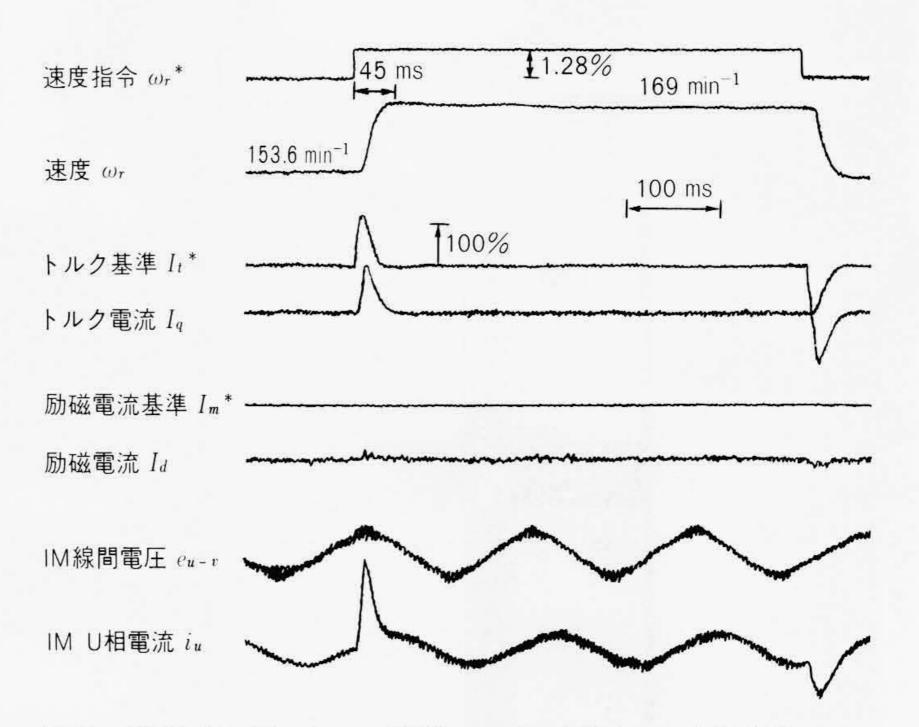


図 3 速度インディシャル応答 ピーク値までの応答時間は45 ms であり、遮断角周波数 $\omega_c \cong 70 \text{ rad/s}$ を実現している。

力率の改善を図っている¹⁾。最大出力周波数は50 Hz電源時40 Hzである。一方、中・小容量圧延補機に適用した例として300 kVA級セットパラPWMトランジスタインバータの制御システム構成図を図4に、外観の一例を図5に示す。各トランジスタユニットは数百アンペア、一千ボルト級パワートランジスタの複数個並列を基本構成とし、それらをセットパラ接続して容量拡大を図っている。制御方式は電圧制御方式ベクトル制御を採用し、2 BPUによって全ディジタル化を実現している。主パワートランジスタは約2 kHzでスイッチングさせ、出力周波数約100 Hzを実現している。また、メンテナンスツールの充実によって、トレースバック機能、自動試験機能な

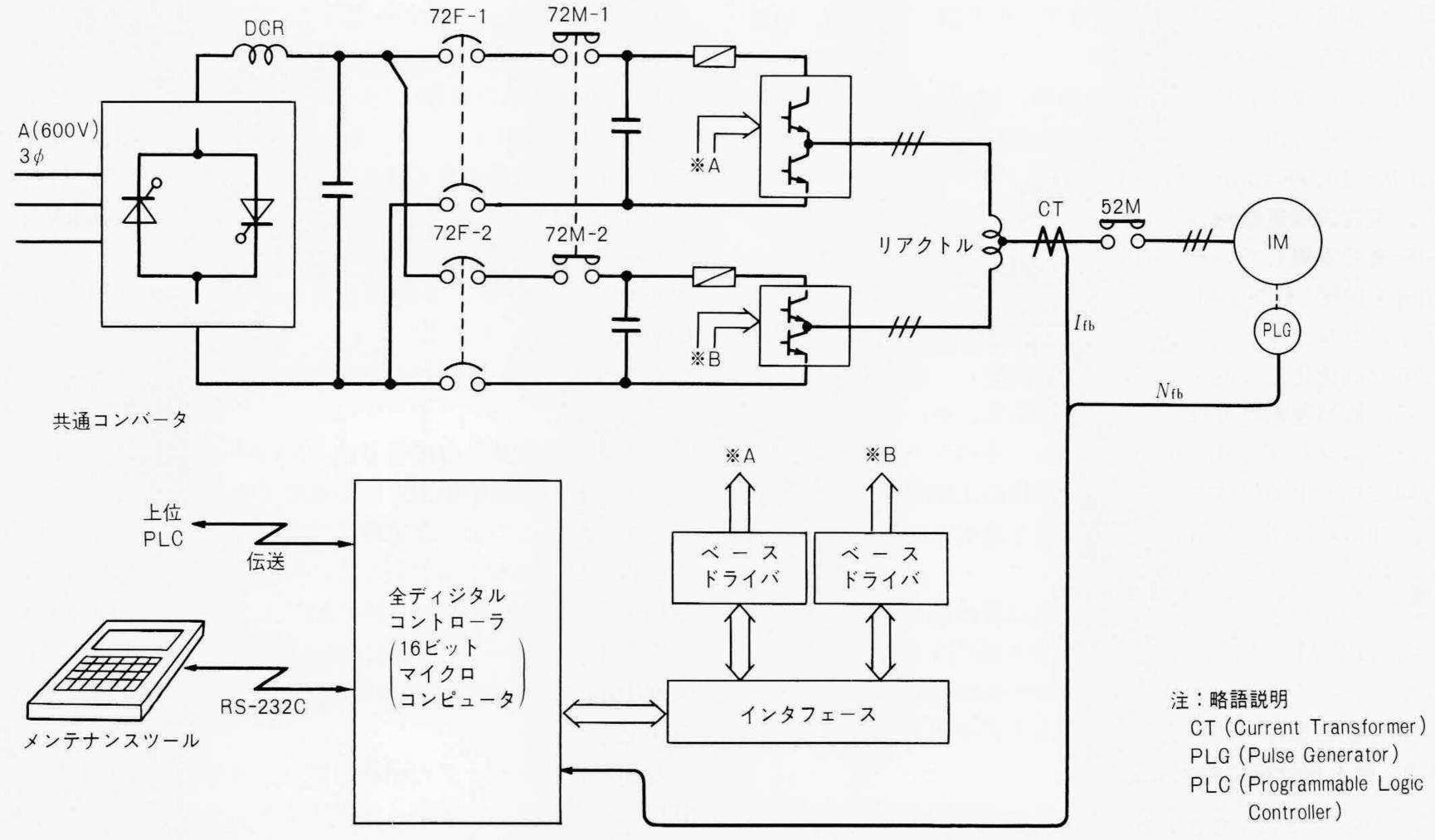


図4 PWM方式トランジスタインバータセットパラ制御システム構成図 全ディジタルベクトル制御により高機能を実現している。

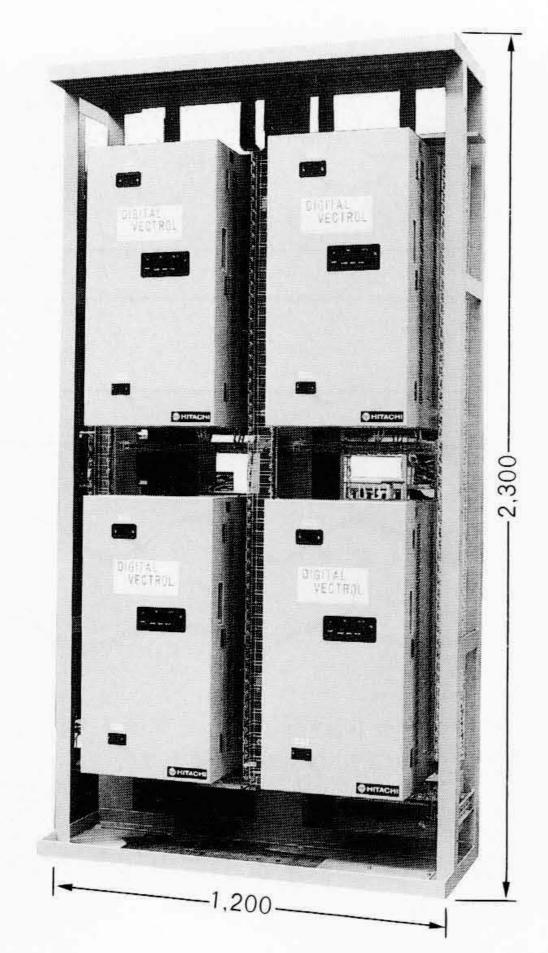


図 5 全ディジタルPWMトランジスタインバータ 各ユニットは10kVA級のインバータである。

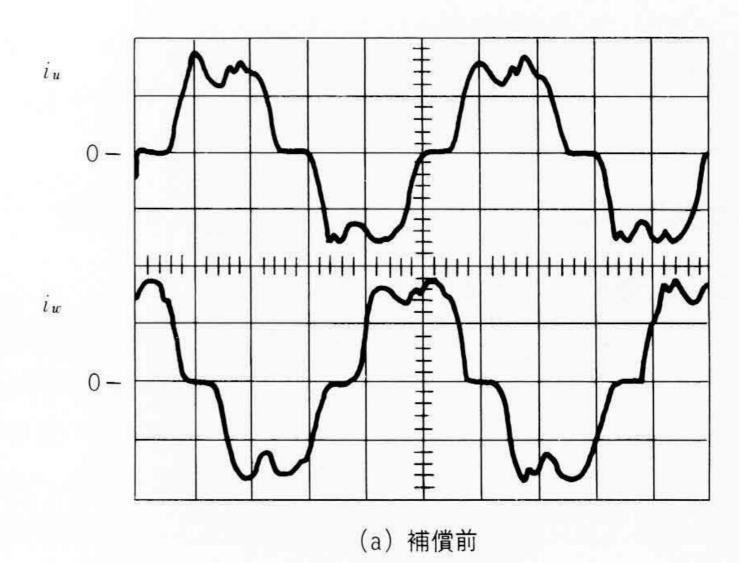
ど、多機能化を図っている。本制御方式には上下トランジスタの短絡防止時間(デッドタイム)による波形ひずみがあるが、日立製作所独自の補償方式によって改善している。すなわち、d-q軸上で界磁電流 I_m *、トルク電流 I_t *及び出力周波数 ω_1 *の基準から補償すべき基本波成分と高調波成分をフィードフォワード的に生成し、それを各相の電圧指令に加える方式を採用して波形を改善し、低トルクリプル化を図っている 2 0。補償前と後の電流波形を図6に示す。

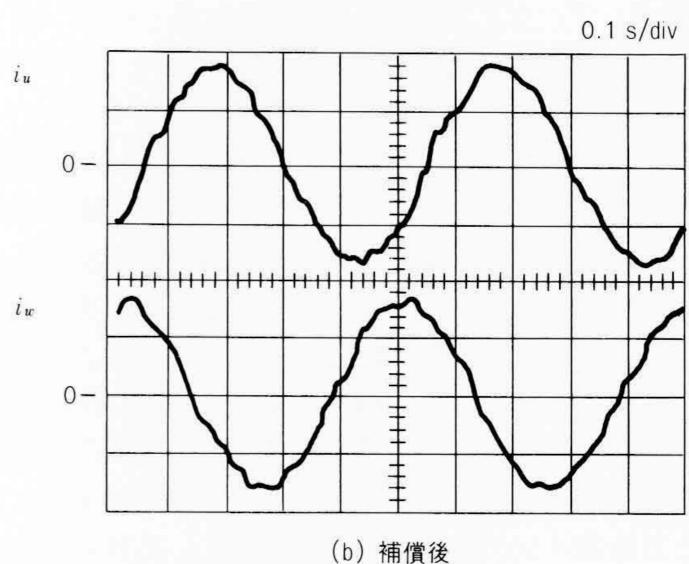
次に、産業用各種ダイナモ試験機にPWMトランジスタインバータを適用した例を示す。試験機仕様としては、回転数8,000~10,000 min⁻¹の高速回転、低トルクリプルの要求が強く、現在誘導電動機容量数百キロワット、最高回転数約1万回転まで実現している。制御方式は、電流制御方式ベクトル制御を採用し、高速回転に対応できるパルス発生器を用いて、ディジタル速度制御を行っている。更に、電流比較部の電流制御を高速化し、低速から高速まで安定した運転を実現している。最高運転周波数は約170 Hzである。更に試験機用途では、トルクリプル低減が重要となる。そのため、スイッチング周波数と出力周波数との比を十数倍以上確保している。トルク補償には積分補償を行い、指令と発生トルクとの定常偏差が出ないように制御している。

以上の応用例のほかにも、より高品質の製品を生産するために、PWMベクトル制御インバータを適用する例が最近増えており、生産される製品も高品質かつ多様化し、今後ますます高性能仕様に対する要求が強まるものと思われる。

3.2 はん用仕様に対する応用

ファン,ポンプなどの省エネルギーを目的とした一般産業機器の可変速運転への応用について,日立製作所ではこれま





注:略語説明 i_u (U相電流波形), i_w (W相電流波形)

図6 電流波形ひずみ補償の効果 補償後の電流波形が,純正弦波に近いことが分かる。

でに各種のAVAF (Adjustable Voltage and Adjustable Frequency:可変電圧可変周波) インバータを開発提供してきた。不特定負荷への対応や電源力率改善の点から,電圧形 PWMインバータが小容量機を中心に多用されているが,今回 $360\sim1,200~{\rm kVA}$ の容量について,パワートランジスタによる多重電圧形PWMインバータをシリーズ化した。仕様の概要を表 1 に示す。従来のサイリスタ式電流形インバータに対し,体積比で約40%とコンパクト化を図っている。 $1,200~{\rm kVA}$ インバータの外観を図 7 に示す。16ビットマイクロコンピュータを用い全ディジタル制御を行うとともに,LCD (Liquid Crystal Display) を活用してトレースバック機能やガイダンス機能を充実させ,ユーザーの使い勝手を第一に考えた設計としている。

一方、電力産業への応用では、AVAFインバータを発電プラントの各種補機駆動用として適用するケースが徐々に増えてきている。このような重要プラントへの適用では、高信頼性確保が最大のポイントとなる。日立製作所では今後の需要増加が予想される電力事業用AVAFとして、今回7,000 kVA級の電流形インバータを開発した。なお、同時に3,000 kW、8,000 min⁻¹の大容量・高速電動機も開発し、高速ドライブ試験を完了した。

高信頼性インバータの回路ブロック図を図8に示す。信頼性向上策として、主回路に使用するサイリスタの故障モードが主に短絡によるものであることに着目し直列冗長とし、制

表 I 変圧器多重電圧形PWMインバータ仕様概要 トランジスタ式多相多重インバータ で、従来のサイリスタ式電流形インバータに対し体積比で約40%にコンパクト化されている。

仕

項

目

様

定格容量(kVA)	360	480	600	720	960	1,200	
インバータ相数	12相多重			24相多重			
入 力 仕 様	3相3線, 50/60 Hz, 400 V クラス (入力変圧器で3.3 kV, 6.6 kV受電)						
出力仕様	3相3線, 400 Vクラス at 50/60 Hz (出力変圧器で3.3 kV, 6.6 kV出力)						
整流回路	ダイオード整流回路(標準6相整流,オプション12相整流)						
インバータ回路	トランジスタPWM制御回路						
回路構成	→ 入力変圧器	操作部	(16ビッマイクロ	LCD ディスプレイ) 電動機	
		電圧形PWMインバータ					

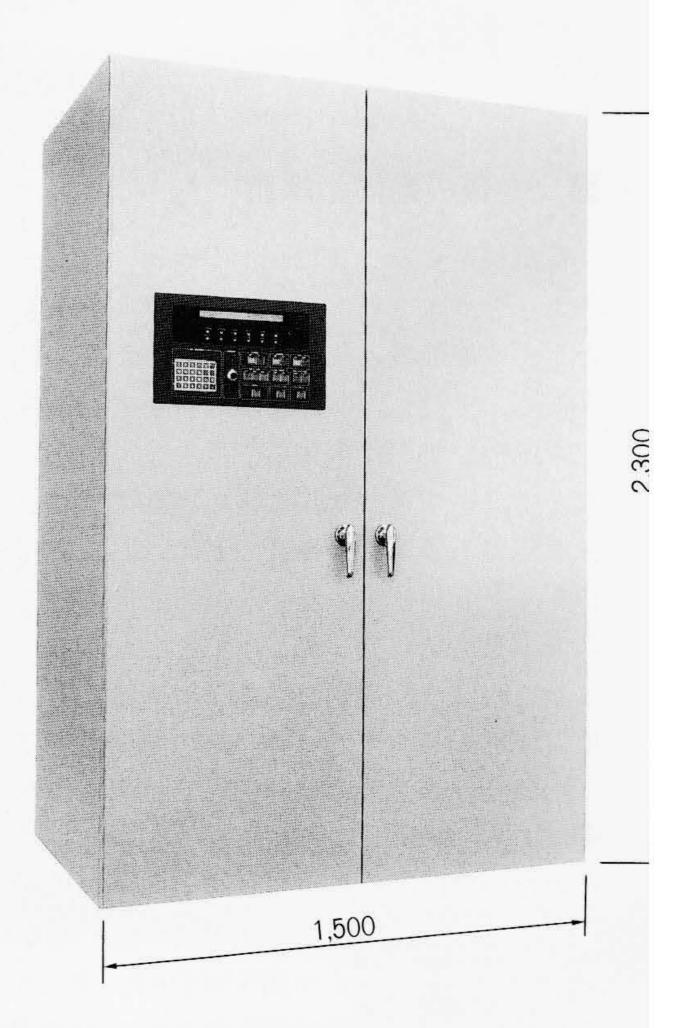


図 7 I,200 kVAトランジスタAVAFの外観 LCD(Liquid Crystal Display)の活用によって, 使い勝手を優先した設計となっている。

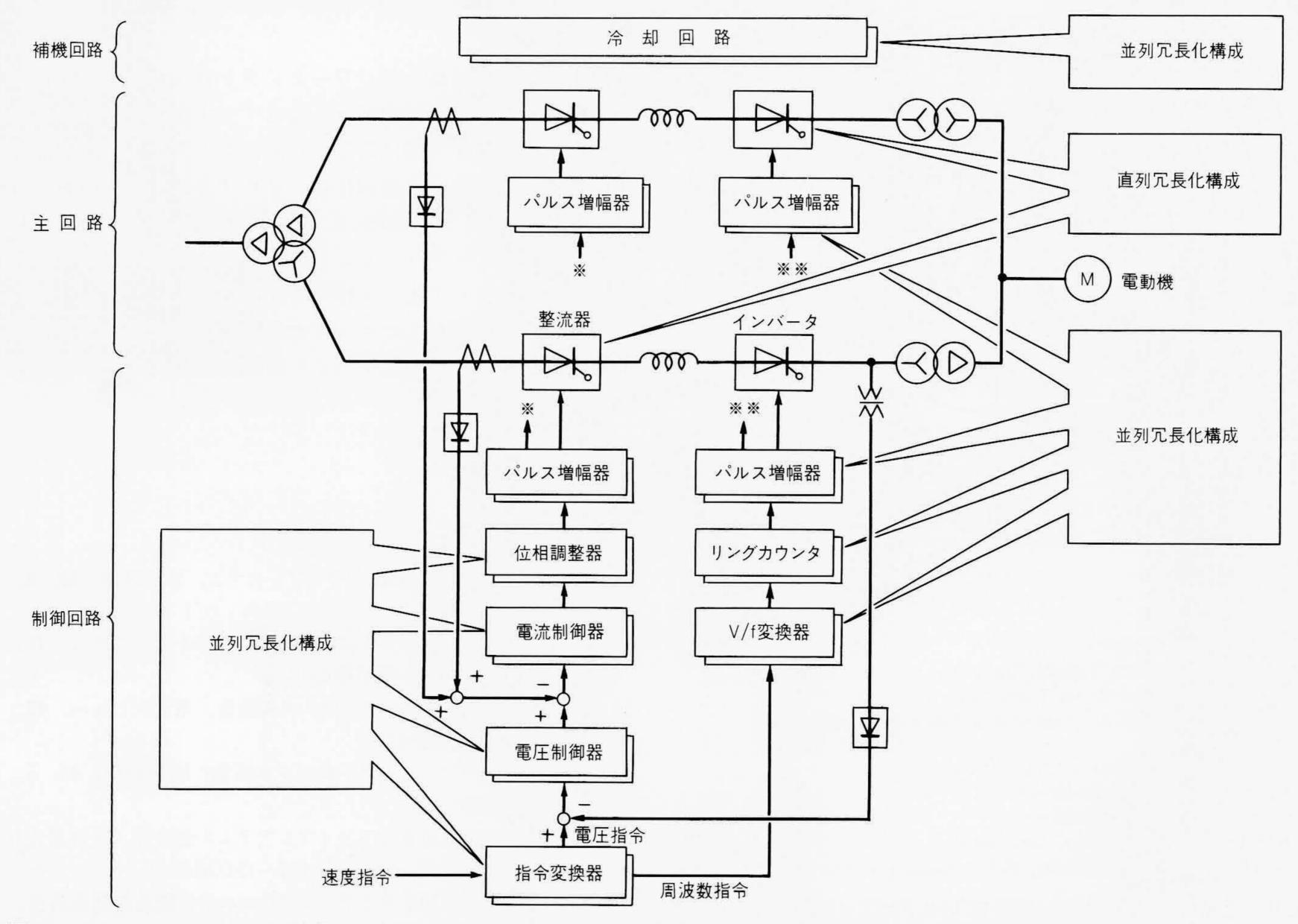


図8 インバータシステムの構成 主回路の直列冗長、ゲート回路を含む制御回路の並列冗長により高信頼度化を図っている。

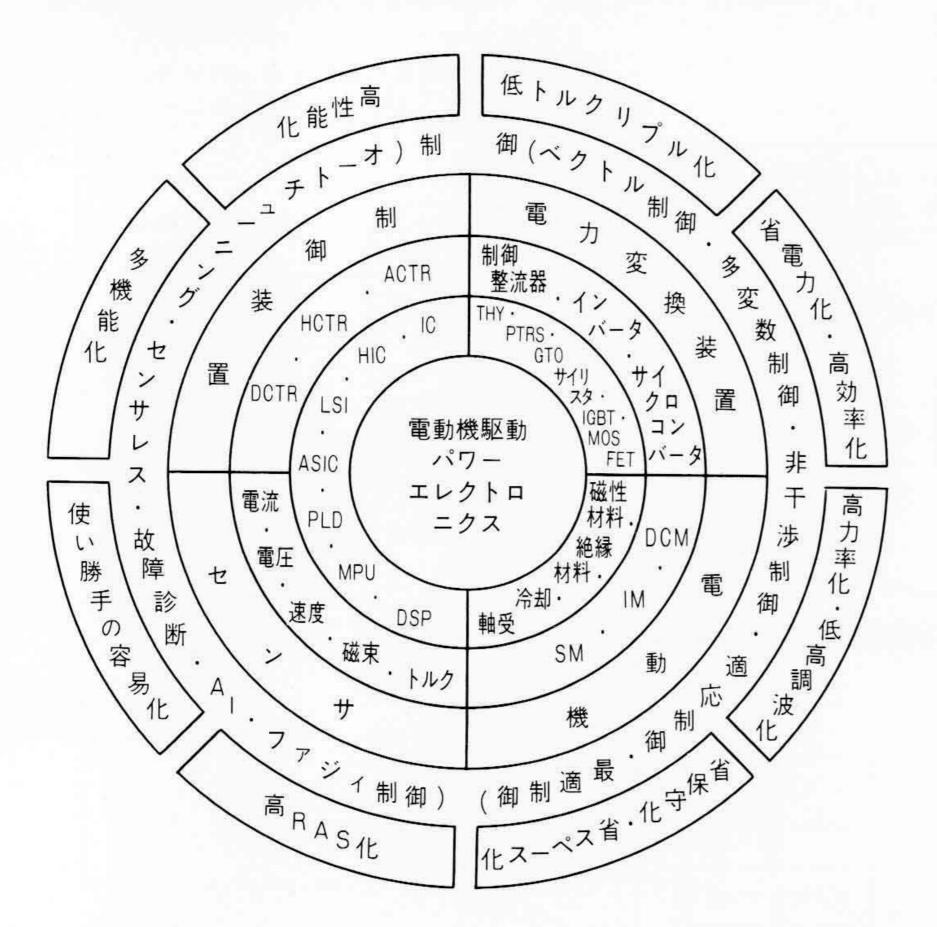
御系はゲート回路を含め並列冗長構成をとっている。これによって, 重要プラントへの適用も可能にした。

4 今後の動向と課題

電動機駆動パワーエレクトロニクスでの関連技術は、パワー素子とマイクロエレクトロニクス素子を主な構成要素とした電力変換装置と制御装置であり、その他にセンサと電動機がある。それらの関係をニーズを含め図9に示す。

電動機駆動が交流化の方向をよりいっそう鮮明にしているなかで、まず電力変換装置の今後の課題は、入出力波形の正弦波化である。この場合の必す(須)条件は変換装置の効率を少なくとも現状レベルより低下させないこと、及び入力電源の力率を高調波を抑制しながら一近傍に制御することである。このためには、自己消弧素子の高速化と低損失化が、また入出力波形正弦波化のための技術開発が要望される。

次に、制御装置の課題としては、入出力波形の正弦波化制御に加え、駆動システムとしての高性能化と多機能化である。そのためには、ハードウェアとして最近の主流であるディジタルコントローラの高速化とその使い勝手の柔軟性が課題である。前者に対してはBPUやDSP、そしてそれらの周辺LSIの高速化や多機能化が進展中であり、技術的には可能である。



注:略語説明

THY (Thyristor)

PTRS (Power Transistor)

GTOサイリスタ (Gate Turn Off Thyristor)

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

MOS FET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) HIC (Hybrid IC)

ASIC (Application Specified Integrated Circuit)

PLD (Programmable Logic Device)

DSP (Digital Signal Processor)

RAS (Reliability, Availability, Serviceability)

ACTR, HCTR, DCTR (Analog, Hybrid, Digital Controller)

図 9 電動機駆動におけるパワーエレクトロニクスの関連技術 駆動システムの技術分野とニーズを示す。 後者に対してはソフトウェアの比重がますます高くなる傾向になってきており、その高度利用と開発期間のスピードアップが特に要請される。

駆動システムの性能に関し、ディジタル制御では、精度はセンサの精度や分解能と演算語長で決まり、応答は電力変換器の転流、又はスイッチング回数と最高速制御ループである電流制御ループのサンプル時間によって決まる。したがって、駆動システムのよりいっそうの性能向上には、計測可能な電流、電圧、速度など基本的なセンサの高性能化に加えて、計測の困難な制御変数を推定するオブザーバを併用するとともに、多変数制御理論を効果的に適用した制御アルゴリズムをディジタルコントローラで高速に演算する必要がある。電動機駆動システムの高応答化を阻害する最も根源的な要因はトルクリプルであり、その主な発生要因は電力変換装置の高調波である。今後、電動機駆動システムでは発生するトルクリプル及び外乱トルクリプル、電源力率や電源高調波の改善を主な目的として、それらと駆動システム特性との協調制御がますます重要課題になってくる。

その他、駆動システム性能や機能の高度化に伴い、制御アルゴリズムはますます複雑、高度化している。試運転期間や故障時の早期立上げが重要課題である。前者に対してはオートチューニング技術が、後者に対してはAI(Artificial Intelligence:人工知能)を利用した故障診断技術の確立が要請される。

5 結 言

以上,電動機駆動へのパワーエレクトロニクスの応用について概説した。電動機駆動は今後ますます交流化とディジタル化を指向するすう勢にある。今後のニーズとして,製品加工産業では高品位化や微細化が,またプラント補機駆動ではノントリップ化,超信頼性化,超高速化がある。また,運転操作の面ではインテリジェント化,情報化の進展に伴い,ますますソフトウェア化,多様化が要請される。

日立製作所はこれらのニーズに迅速に対応すべく, 更に高 品質, 高信頼性で使い勝手のよい電動機駆動システムを提供 していく考えである。

参考文献

- 1) 佐藤, 外: 圧延機用ACドライブシステム, 日立評論, **68**, 8, 619~624(昭61-8)
- 2) 木谷,外:鉄鋼プラントにおけるACドライブシステム,日立 評論,70,6,659~664(昭63-6)
- 3) 桑原,外:パワーエレクトロニクス特集,東芝レビュー, **43**, 4,327~360(昭63-4)
- 4) 長谷,外:パワーエレクトロニクス特集,富士時報,**61**,5,315~341(昭63-5)
- 5) 深尾,外:交流可変速ドライブシステムの高性能・大容量化技術,電気学会雑誌,108,2,127~151(昭63-2)
- 6) 電気学会:産業用ドライブエレクトロニクス調査専門委員会, 電気学会技術報告(Ⅱ部),第186号(昭61-4)