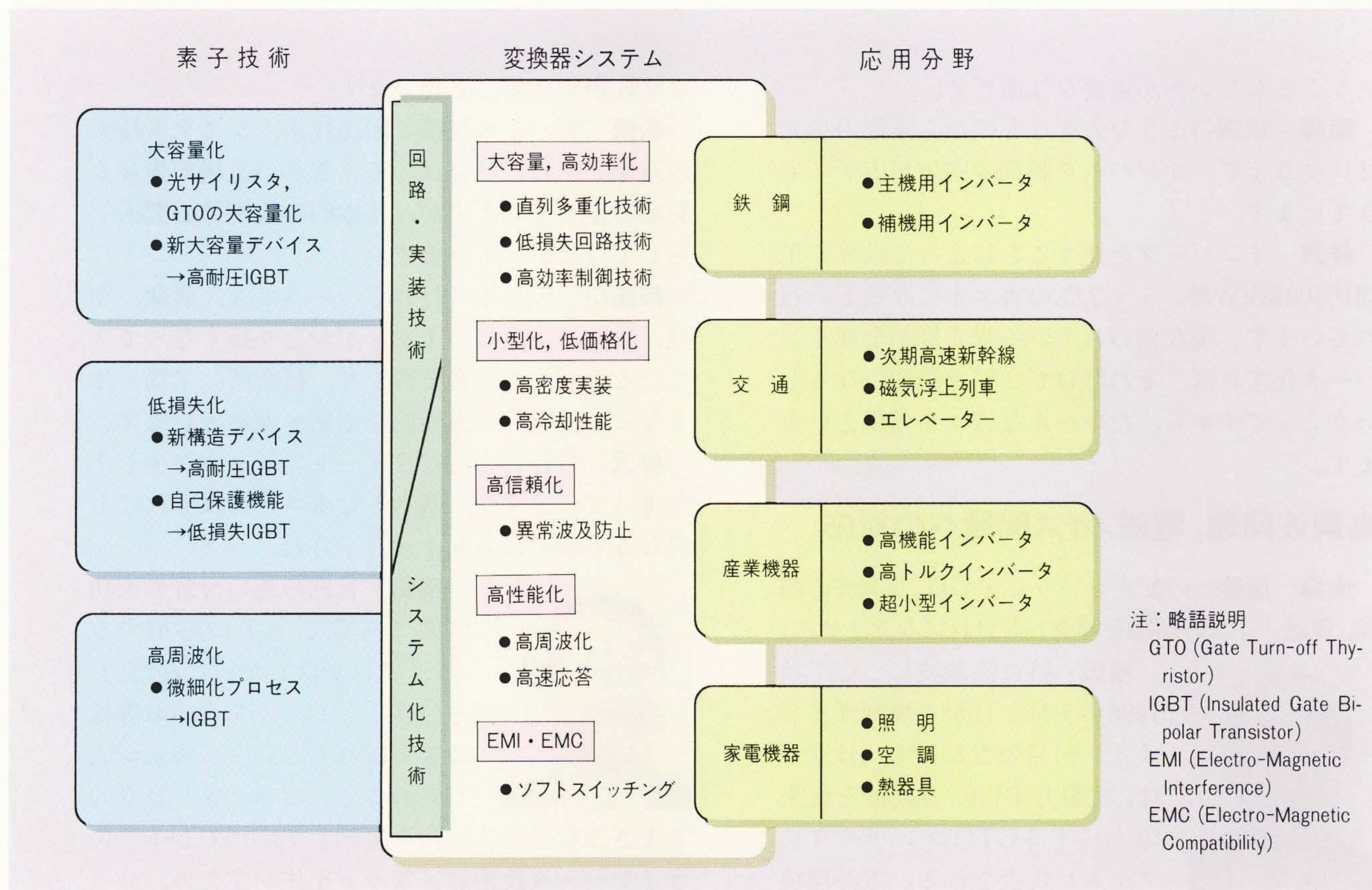


応用分野が広がるインバータ技術の動向

Trends of Inverter Technologies

柳川 薫* Kaoru Yanagawa



インバータの技術動向

インバータ技術は、素子の性能向上とそれを応用する技術の発達により、さまざまな分野に広がってきている。

パワーエレクトロニクスは汎用インバータをはじめ、電気自動車、家電機器、電力機器、産業機器、交通車両などの広い分野に適用されている。その中心となる技術がインバータ技術であり、システムの省エネルギー化、高性能化、高機能化に欠かせない技術となっている。特に、機器の駆動源となるモータの制御では、インバータによって電圧、電流が適切に供給でき、回転速度と駆動トルクを自由に制御することができる。

このように種々の分野で不可欠となっているインバータは、スイッチング素子の大容量化・高周波化、マイコン(マイクロコンピュータ)の高性能化、制御

技術や回路技術の高度化により、小型化、高応答化、高出力化、高信頼化が図られている。

一方、インバータの適用によって電源系統への影響、周辺機器への電波障害、周辺環境への電磁騒音、振動音などの低減が問題となってきている。これは、インバータの高周波スイッチング、大電流化の影響のためであり、高周波抑制対策、電磁遮蔽、騒音低減など環境対策が今後の大きな課題となっている。

パワーエレクトロニクスの技術進歩とともに、インバータ技術は太陽光発電やアクティブフィルタなど新しい分野への適用が期待される。

* 日立製作所 日立研究所

1 はじめに

近年、地球規模でのエネルギー資源枯渇の問題とともに環境保全の面から、つまりCO₂の総排出量低減などの観点から、省エネルギー化、高効率化のための技術開発と普及が重要度を増している。一方、産業機器の高度化、複雑化に伴い駆動機器の高性能化、小型化、さらには使い勝手の向上、騒音などへの配慮が必須(す)技術となっている。このような観点から、産業機器の駆動源となるインバータでも省電力化、小型化、高性能化に向けて種々の技術開発が行われている。

ここでは、省エネルギーで、きめ細かいモータ制御ができるインバータ技術について述べる。

2 インバータ技術

インバータシステムは図1に示すように、交流をコンバータで直流に変換し、この直流を高周波スイッチング素子でモータ駆動に必要な所定の周波数の交流に変換するインバータで構成するものである。このようなインバータシステムの核となる技術が、4ページの図に示す素子技術、変換器システム、および各応用分野での制御技術である。

インバータに用いられるパワー素子は、サイリスタからGTO、IGBTへと変わってきており、素子の大容量化、低損失化、高周波化が進められてきた。変換器システムでは大容量、小型化等の回路実装技術と、高性能化、高信頼化などのシステム化技術を発展させ、広い応用分野に適用できるシステムが開発されている。各応用分野では、インバータ駆動のためのPWM(Pulse Width Modulation)制御技術のほか、V/F(Voltage/Frequency)制御、ベクトル制御、さらにはモータ制御でのセンサレス速度制御などの技術開発が行われてきた。各技術動向の

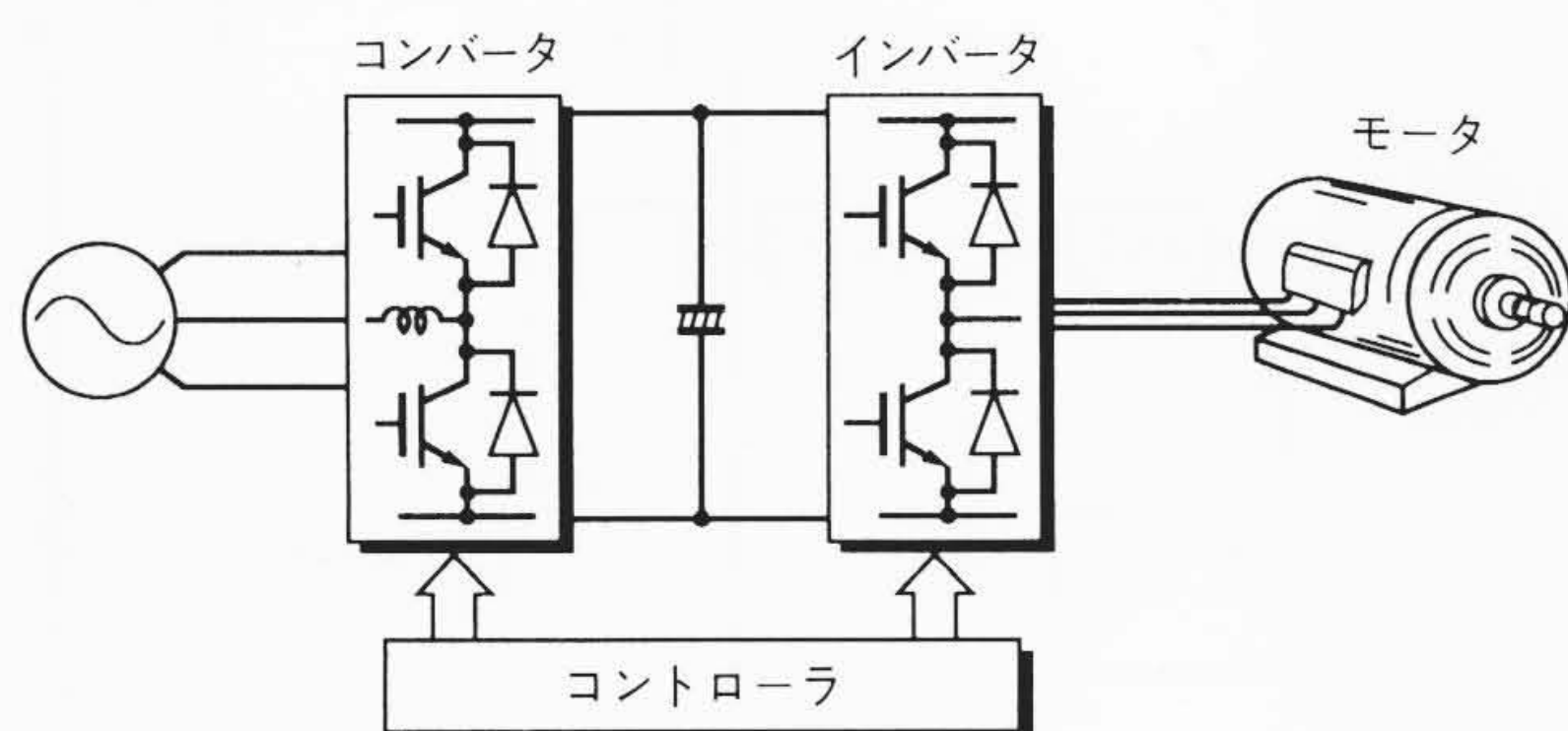


図1 インバータの構成

コンバータで直流にした電源により、インバータはモータを任意の周波数の交流で駆動する。

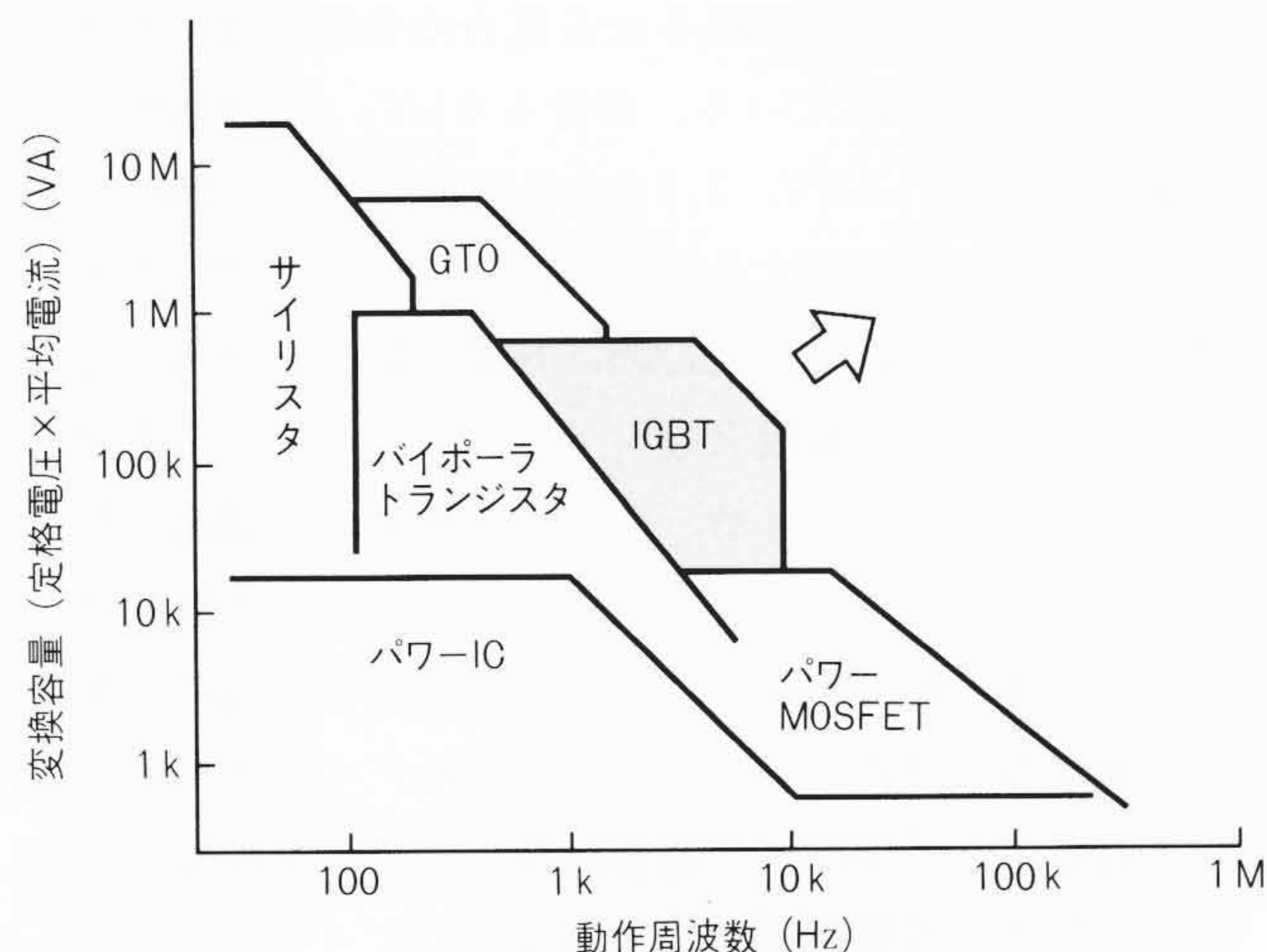


図2 スwitchング素子の使い分け

スイッチング素子は使用される容量と用途に応じて、さまざまなものが使われる。現在は、使いやすく比較的高速で大容量のIGBTが使われる範囲が広がってきている。

詳細と今後の新しい応用分野について以下に述べる。

3 デバイスの発達

インバータの応用分野を拡大するにはその大容量化が必須であり、モータに加える電圧と電流を制御する大電力のスイッチング素子が必要である。その先駆となったサイリスタが開発されてから40年弱が経過し、この間に耐圧、電流容量、スイッチング速度などの性能改良が行われてきた。新しい種類のデバイスも次々と開発され、図2に示すように、扱う電力とスイッチング速度によって種々のデバイスが使い分けられるようになったのもその一つである。

モータを駆動するスイッチング周波数が人間の可聴範囲内であると、その周波数での電磁振動が発生し、人間の耳に騒音として聞こえてしまうという現象がある。この対策には、スイッチング周波数を高くする必要がある。比較的小容量の分野では、スイッチング速度の速いIGBTやMOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)を用いている。IGBTは大電力が扱えてスイッチング速度も速いために広範囲で使われ始めており、現在も耐圧、オン損失、スイッチング速度の改良および使い勝手の改善が図られている。

しかし、可聴域に入ってもかまわない用途には、バイポーラトランジスタも用いられている。また、大容量の分野ではGTOが電力、圧延、車両などに用いられている。容量も4.5 kV、4 kA^{2),3)}のものが製品化され、さらに大容量の6 kV、6 kA品の開発が進められている。大容量

でも変換器効率が重要視される電力の分野では、光サイリスタが用いられている。容量も6kV、2.5kAのものが製品化され、8kV、3.5kAのものが開発中である。

インバータを制御する回路も、初期にはすべてアナログ回路が使用されていたため、複雑な制御を行おうとすると、膨大な回路規模となっていた。一方マイコンは、1970年代に4ビットのものが家庭電気品に使用されてから、急速に発展してきた。また、ICの製造プロセスもメモリICの進歩とともに微細加工化が進み、集積度が向上してきた。そこで、これらのデジタルICの進歩を背景に、インバータ制御回路のデジタル化が進み複雑な制御も容易に取り込めるようになってきた。例えば汎用インバータに採用しているセンサレスベクトル制御には、当初8ビットマイコンH8/500シリーズとゲートアレーの組み合わせを用いたが、PWM制御に適した機能を盛り込んだマイコンの登場で、制御性能の向上も実現した。現在では16ビットマイコンH8/300シリーズや、32ビットマイコンSHシリーズを用いることにより、マイコン1チップでの制御を実現している。これにより、機器の小型化、部品数の削減、信頼性の向上、コストの低減などが実現できる。

4 制御技術の発達

前述したように、デバイスの発達によって高度な制御が可能となってきた。この章では、インバータ技術を牽(けん)引してきた制御の方式について述べる。

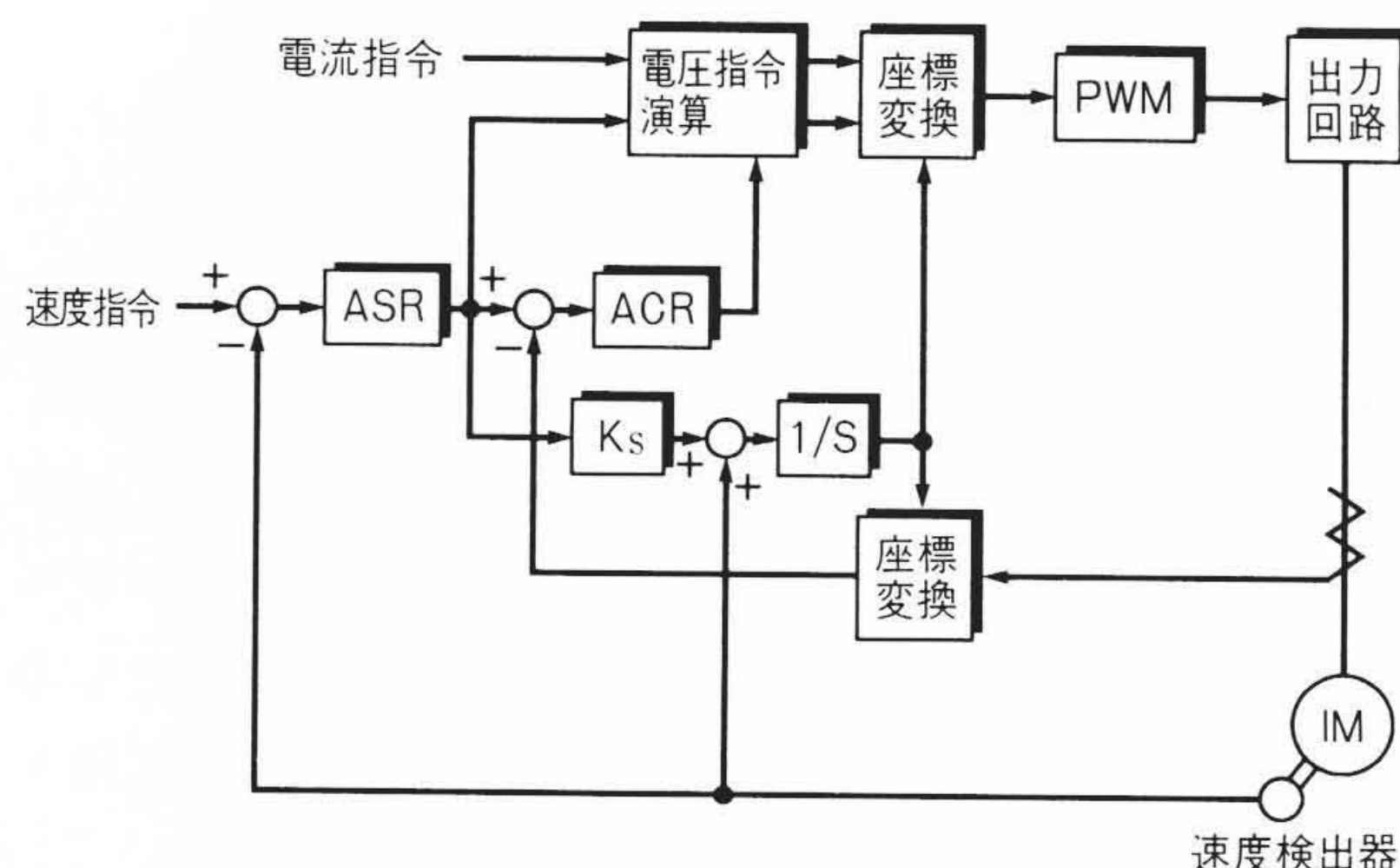
(1) V/F一定制御

インバータでモータを駆動すると、電圧と周波数が変わえられるため、モータのトルクと回転数が自由に設定できる。このとき回転数が高いほど電圧が必要となるため、周波数と電圧を比例させて制御する方式がある。これがV/F一定制御である。この方式は制御が簡単であるために広く用いられているが、低速でトルクが出にくいとか、負荷が重くなると回転数が落ちてしまうなどの欠点がある。

そのため、この方式の使い勝手を改善するために、ファジィ制御を用いて加減速を行う方法も開発している。

(2) ベクトル制御

V/F一定制御の欠点を解決するには、モータに速度検出器を設ければよい。回転数を検出することにより、駆動に必要な電流を求めて制御する方式にベクトル制御がある(図3参照)。この方式では、高応答で高トルクの制御が行えるので、鉄鋼の圧延、エレベーターをはじめAC



注：略語説明

ASR (速度制御器), ACR (電流制御器), IM (誘導電動機)

図3 ベクトル制御ブロック図

電流・電圧をベクトルで制御することにより、誘導電動機を高応答に制御することができる。

サーボなど高度な制御性能が要求される分野で幅広く利用されている⁴⁾。

(3) センサレスベクトル制御

速度検出器なしで制御を行うのがセンサレスベクトル制御方式である(図4参照)。モータに印加した電圧と電流およびモータ定数からモータの状態を推定し制御するものであり、1980年代の後半に他社に先駆けて汎用インバータに適用し実用化した。

センサレスベクトル制御では、モータ定数を同定することが必要なため、その定数を自動的に測定するオートチューニング技術を開発した。この技術により、既設のモータや定数の不明なモータであってもセンサレスベクトル制御で駆動することが可能となった。

V/F一定制御に対して優れている低速のトルクでは、1Hz200%を実現している。今後もより低速、例えば0.5

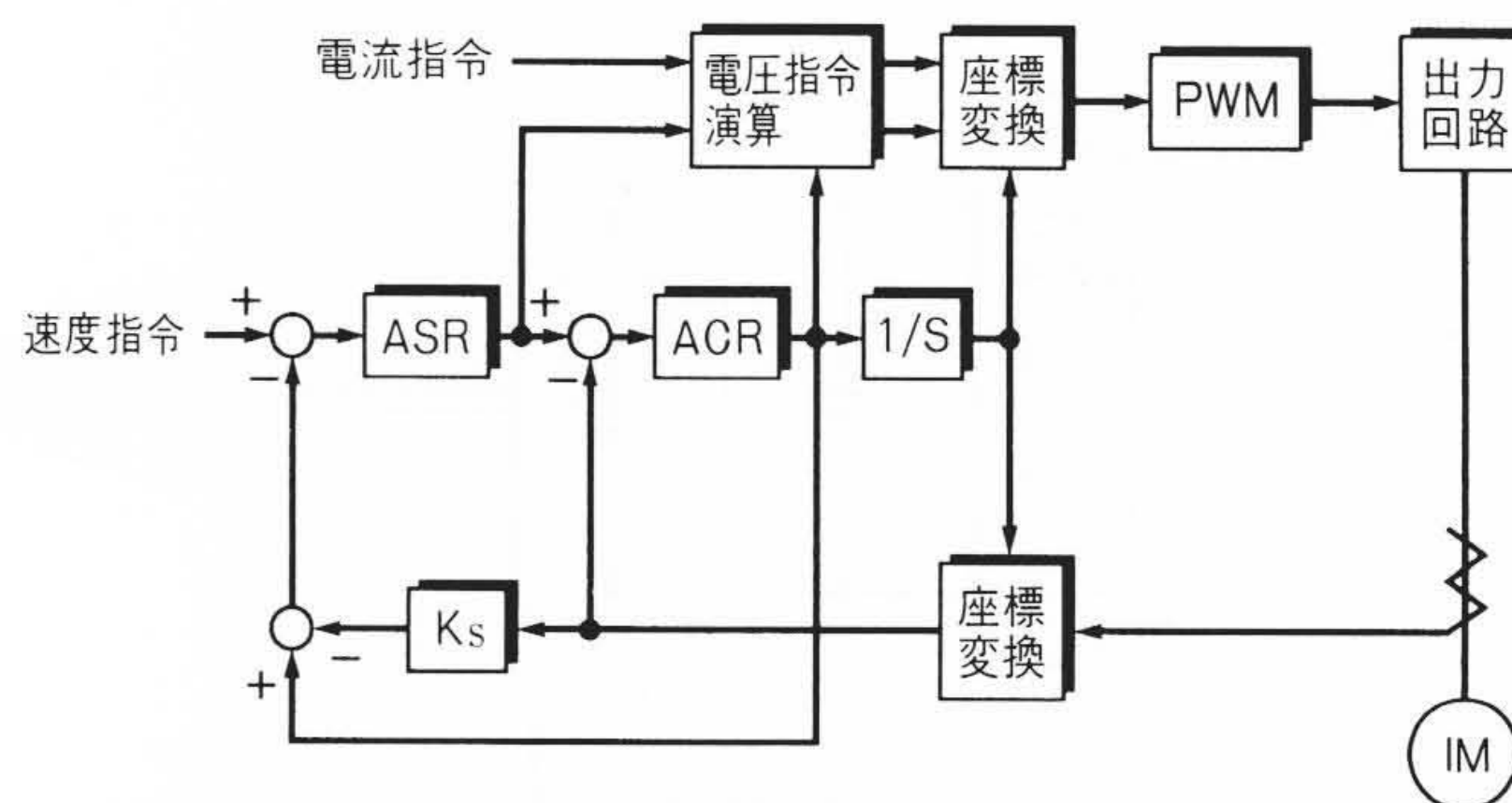


図4 センサレスベクトル制御ブロック

速度検出することなく速度制御ができる。低速でも高トルク出力が可能であり、負荷変動に対する速度変動が小さい。

Hz以下でのトルクを実現するための開発を行っていく。さらに、回生時の特性やロバスト性の改善を行ってセンサレスベクトル制御の適用範囲を広げている。

5 回路実装技術

インバータの主回路部を図5に示す。スイッチング素子と電源コンデンサの間には配線インダクタンスが存在し、スイッチング素子をオフにすると、インダクタンスに蓄えられたエネルギーによって高い電圧が発生する問題がある。この電圧を抑えるためにスナバ回路と呼ばれる回路を用いたり、配線インダクタンスを小さくする実装方法を採用している。近年は、シミュレーション技術の発達によって高密度実装技術が長足に進歩し、小型化、低損失化に貢献している。

また、大電力を扱おうとすると、スイッチング素子の容量が不足する場合も多い。この場合には、回路を直列あるいは並列に多重化する技術を開発してきた。直列多重式といわれる3レベルインバータ(図6参照)などの種々の方式を実用化している。これらの技術によって車両、鉄鋼の圧延などの広い分野でインバータ技術の応用を可能にした。一方で小型化、低コスト化のため、スイッチング素子の改良によって積み重ねる段数を減らす努力も続けている。

小容量の分野では、スイッチング素子と保護回路や駆動回路などを同じモジュールに実装し、さらに制御マイコンなども取り込んだりして、機器の小型化を図っている。また、これらの回路を誘電体分離技術を用い、回路のすべてを組み込んだパワーICも開発している。

6 新たな応用分野

前述したように、インバータ技術はさまざまな分野で応用されている。この章では今後普及が期待される、い

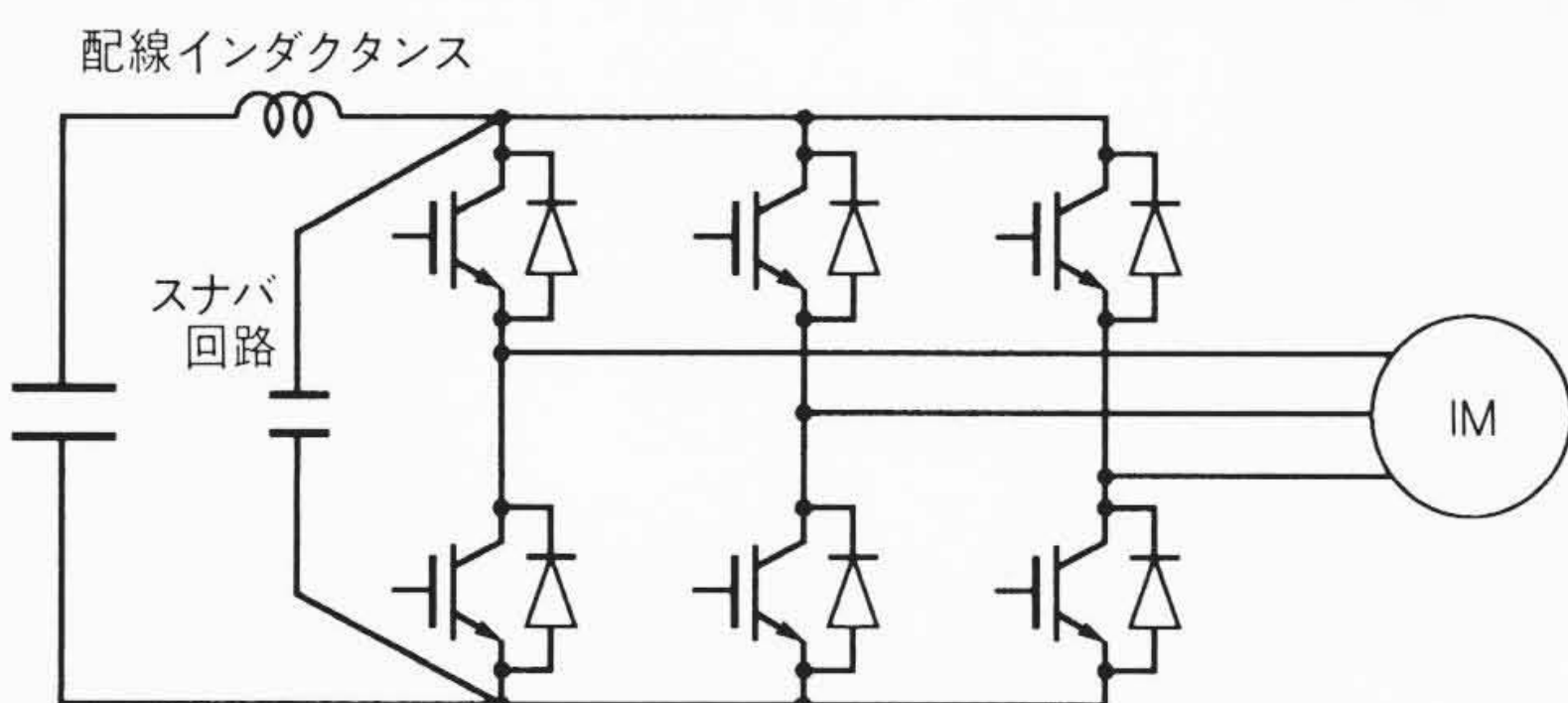


図5 インバータ主回路

直流を三相交流に変換するインバータの主回路である。素子の耐圧を下げるためには、配線インダクタンスを小さくし、最適なスナバ回路を設ける必要がある。

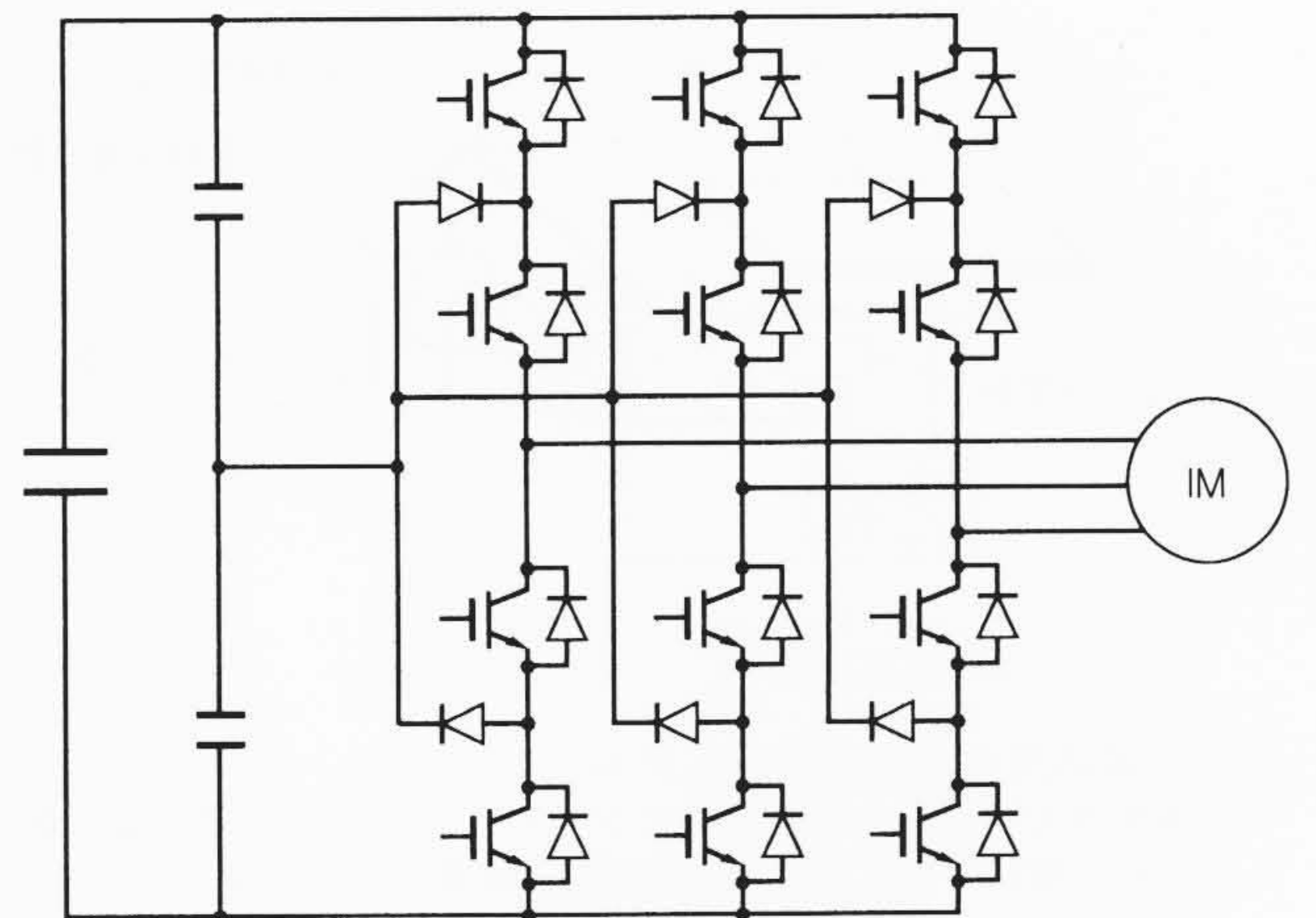


図6 3レベルインバータ

スイッチング素子の耐圧が不足しているときには、図で示すような方式を用いる。さらに段数を積み増す方式もある。素子は大容量ではGTOなどが用いられる。

くつかの新しい分野について取り上げる。

6.1 太陽光発電システム

資源に乏しいわが国では、無尽蔵といえる太陽エネルギーの利用が重要なテーマである。しかし、従来は太陽電池をはじめ周辺機器の価格が高く、一般に普及するには至ってなかった。

最近、普及促進のため、系統に逆潮流が認められたことによって蓄電池が不要となった。つまりインバータ技術により、太陽電池で発電された直流を交流に変換して系統に戻すことが可能となったからである。なお、逆潮流が認可される前から日立製作所は離島用のかんがいシステムや、太陽光を用いた噴水システムを開発してきている。

太陽光発電システム(図7参照)はコストの低減が最大の課題であり、3kWシステムで150万円程度で普及に弾みがつくと思われる。さらに、政府補助も始まったため、普及に弾みがつくものと期待される。2000年には1,000億円前後の市場に成長すると見込まれている。日立製作所はインバータ技術の蓄積を生かして早期にこのシステムが普及できるレベルに到達するよう開発を進めている。

6.2 アクティブフィルタ

近年、テレビ受像機やパーソナルコンピュータに代表される電子機器が増加してきた。これらの機器は直流電源で動作するため、系統電源の交流を直流に変換して用いている。このため系統に流れる低次高調波が増加してきている。

これに対し、高調波抑制対策ガイドラインが決められ、その後の規制は強化されていく予定である。また諸外国

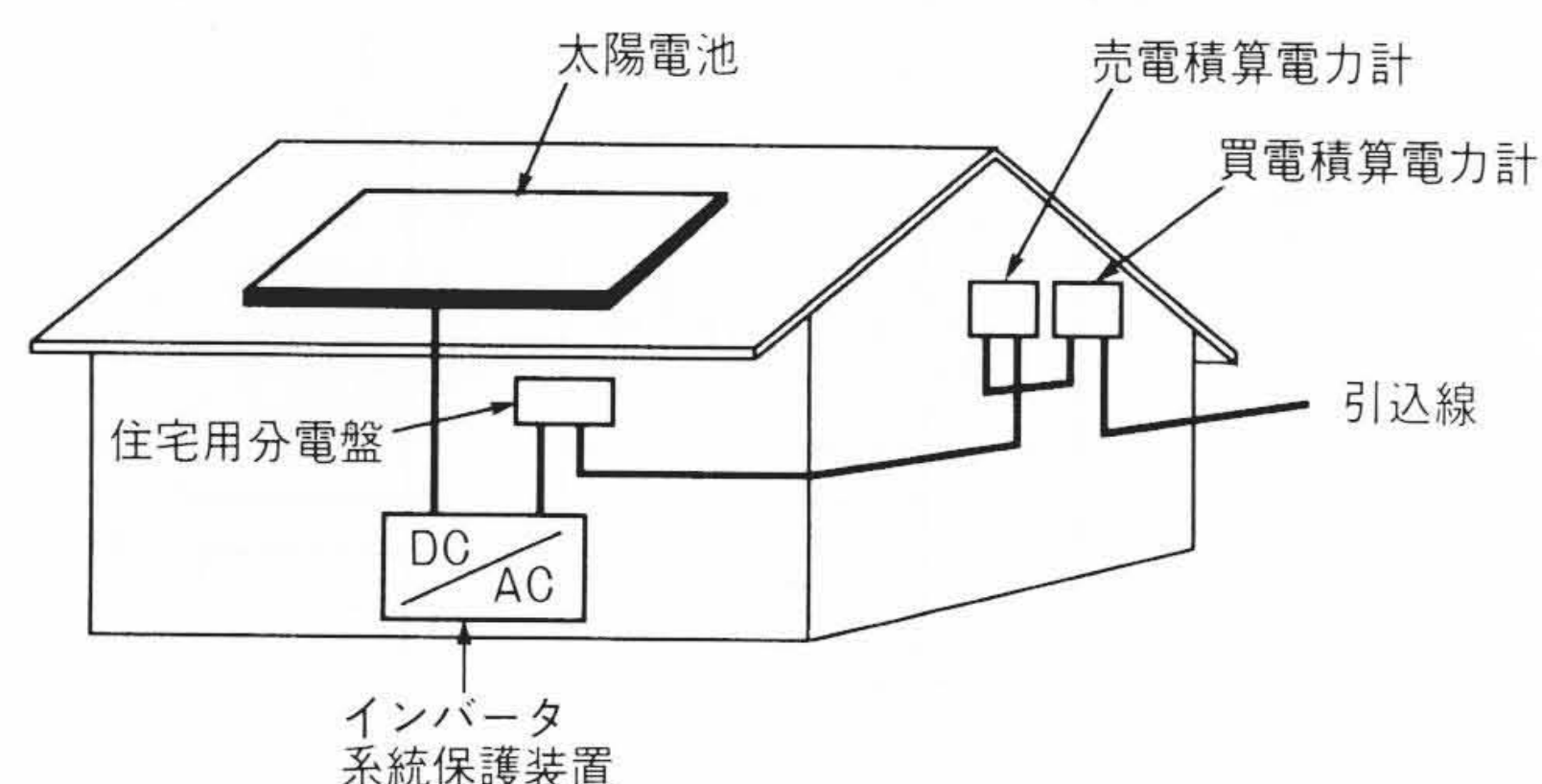


図7 家庭用太陽光発電システム

太陽電池で発電された直流をインバータで交流に変換する。さらに系統に接続するためには、系統保護装置も必要となる。

でも同様の動きがあり、特に欧州では厳しい規制が行われる見込みである。

このため、需要家側では、ガイドラインに沿った対応が必要となる。一方、進相コンデンサと系統の変圧器などによるインダクタンスとの間で、低次高調波が共振を起こすことによって過大な電圧、電流が生じるという問題があるため、供給側ではその対策が必要となる。

これらの電源品質を改善するにはパッシブなフィルタでは不十分であり、アクティブなフィルタを用いる必要がある。これには、系統に流れる高調波電流を検出し、これを補償する電流をインバータ技術を用いて流し込む技術を用いる。日立製作所は数十MVA級の大規模な無効電流の補償装置も開発しており、供給側、需要家側双方の対策技術により、小型で低価格なシステムを製品化していく予定である。

6.3 電気自動車

米国カリフォルニア州では、1998年から販売する自動車の2%をZEV (Zero Emission Vehicle)、つまり電気自動車としなければならないという法律が検討されている。世界的にも低公害車化は必要であると考えられており、来世紀初めころから普及が促進されると思われる。電気自動車では、走行条件に合わせた制御がインバータで高効率に行われている。

現状では動力性能がガソリンエンジン車に比べて劣っているため、モータやインバータの小型軽量化や、バッテリーの高容量化など、多方面での技術開発を行っている。

7 おわりに

ここでは、半導体および制御技術の進歩に支えられ、省エネルギーで、きめ細かいモータ制御ができるインバータ技術について述べた。今後のインバータ技術の進歩によって各種機器の小型化、高性能化、低価格化がますます進み、インバータの応用分野が広がっていくと思われる。さらに、低公害、低ノイズが必要な機器にも次々に使われていくことが期待される。

日立製作所は、大電力から小電力まで幅広い分野にわたって活用できるインバータを製品化しており、デバイス技術、制御技術、その上位のシステム技術を含め広範囲の技術の開発を行ってきた。今後も、新分野も含め多くの分野でインバータ技術を発展させていく考えである。

参考文献

- 1) 深尾, 外: 講演論文集, 平成4年電気学会全国大会, シンポジウム S6, 8
- 2) 長南, 外: 高力率・高調波低減を実現した大容量GTOドライブシステム, 日立評論, 75, 6, 415~418(平5-6)
- 3) 山口, 外: 高性能・交直両用4軸インバータ制御電気機関車, 日立評論, 76, 5, 367~372(平6-5)
- 4) 金, 外: 講演論文集, 平成6年電気学会全国大会, シンポジウム S4, 7, 9