UDC 621.311.6 : 621.314.5.029.4 : 621.382.026

パワーエレクトロニクス技術の現状と展望

井村 輝夫(いむら てるお)　原 力(はら つとむ)　高橋 浩(たかはし ひろし)

1 まえがき

パワーエレクトロニクスは，エレクトロニクス，制御，電力の結合・融合した新しい技術分野として定義されてから二十数年が経過した。その間に一般産業分野のVVVFインバータから，交通輸送分野，電力分野，家電業務用民生分野，情報通信用分野とその応用分野を大幅に拡大してきた。その背景にはまず電力エネルギーの有効的利用および利用の利便性・融通性のニーズがあったが，次第に電力用半導体デバイスの高周波スイッチング特性の向上が相加わって，装置の小形軽量化，低騒音化および多機能化を実現する必要不可決な技術として主要な分野に普及・定着してきた。今や主要な産業の基盤技術の一つとして活用されている。

本特集は上述のパワーエレクトロニクスのうち，可変速駆動装置を除く電源装置を中心に編集している。本稿ではこの電源装置の富士電機における最近の開発状況の一端を概観し，需要家各位のご理解・ご支援をいただく一助としたい。

2 電力用半導体素子と電力変換装置の進歩

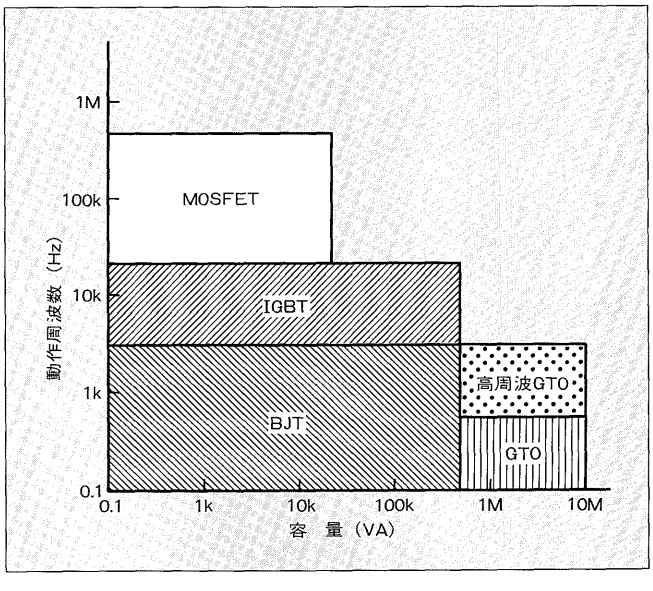
2.1 電力用半導体素子および適用技術の現状

最近のパワーエレクトロニクス製品に適用される電力用半導体デバイスのほとんどは自己消弧形素子であり，その性能向上に負うところが大きい。例えば，容量数百kVAまでの電力変換装置は従来，バイポーラトランジスタ（BJT）がコストパフォーマンスの優れた素子として多用されてきた。

最近はさらに素子の高周波スイッチング特性と小電力ゲート駆動特性を生かして，装置のコンパクト化と高性能・多機能化を実現する高周波パワーデバイスとして，MOSFET，IGBTの適用が進んでいる。そのうち特にIGBTはMOSFETの高周波スイッチング特性とBJTの低オン電圧特性という両者の特長を併せ持つことから適用が急速に拡大している。スイッチング周波数はBJTに比較して1けた以上アップできるほか，耐圧も600Vと1,200V素子の実用化が進んで，交流入力電圧200V系，400V系への適用拡大をも可能にした。電流の大容量化も進んでいる。無停電電源装置（UPS）電源では三相PWM方式のIGBT変換装置を入力側と出力側の双方に適用して，入力高調波・力率，出力波形の入出力特性の改善を実現している。

次に1,000kVA以上の大容量装置では，GTOサイリスタ（GTO）の適用開発が進展している。電圧で，2.5kVと4.5kVの素子が実用になっており，中小容量で適用全盛のIGBTと比較してスイッチング周波数は1けた低いが，高圧素子であることが大容量装置への適用の決め手となっている。高効率化のために低損失スナバ，スナバエネルギー回生などの技術開発も進んでいる。また，逆並列になるダイオードを内蔵して一体化した逆導通GTOの出現は回路構成の簡素化に大いに寄与している。数十MVAクラスの装置ではこの逆導通GTOを用いた単位変換装置を複数台多相多重接続して，高調波を抑制するとともに高効率化を実現する技術も確立されている。そして冷却技術，構造技術の進歩と相まって100MVAクラスの大容量装置も実

図1 自己消弧形パワーデバイスの適用範囲



井村 輝夫

昭和43年入社。パワーエレクトロニクス製品の研究開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発本部電力変換技術開発部長。

原 力

昭和37年入社。主としてパワーエレクトロニクス応用装置の研究開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発本部長。

高橋 浩

昭和38年入社。産業プラント用電機・制御システムのエンジニアリングに従事。現在，電機事業本部電機システム事業部長。

現可能となってきている。

図1 にこれら電力用半導体素子の適用範囲を示す。

今後とも電力用半導体素子の高速化，低損失化の性能向上は進歩し続けると考えられ，それとともに装置の小形軽量化，大容量化，高性能化が進展すると言える。

2.2 電力変換装置の進歩

前述の素子の性能向上を受けて適用技術を開発しながら，これまでの単なる電力変換機能だけでなく，高性能・多機能を持たせて，装置の特性・性能を特徴づける名前の変換装置が開発されてきている。その代表的なものがPWMコンバータ，SMR（Switch Mode Rectifier）コンバータ，高周波リンクコンバータである。回路例を**図2**に示す。

PWMコンバータはAC-DC変換機能を有し，電圧形と電流形に分かれる。そしてSMRコンバータは周波数変換機能を併せ持つが，高周波リンクコンバータはそれぞれの変換機能を各構成ユニットに機能分担させている。いずれも高入力力率と入力電流の高調波抑制を実現する変換装置である。このうち，SMRコンバータと高周波リンクコンバータは入力の商用絶縁トランスを高周波トランスに置換でき，装置の小形軽量化に大きく寄与する。この高周波絶縁トランスのメリットを生かしながら，双方向スイッチを用いて直接AC-AC変換を行うSMRコンバータの開発も実施している。その課題は，双方向スイッチの開発や効率向上などである。

このほか，負荷コイルのインダクタンス（L）と外付けのコンデンサ（C）とのLC共振を利用する共振形インバータもDC-AC変換機能の変換装置として実用化している。これはスイッチング損失とノイズ発生を抑え得る変換装置として特徴がある。

これらはいずれも最近の素子の高周波スイッチング特性を活用して，所望の変換機能を満足させると同時に，小形軽量化，高性能化を実現したものであり，その用途・要求仕様に応じて使い分けている。

2.3 高圧大容量変換装置の進歩

電力用半導体素子の高圧大容量化に伴い，1S1Pアーム構成の単位変換装置の容量も年々アップしている。これと併せて，素子を直並列接続して大容量化する技術も進展している。特にIGBTでは400A素子を最大6Pまで並列接続したスタックを開発し，電流的にほぼGTOに匹敵するレベルまで到達した。また最近では電圧的に2.5kV GTOの半分のレベルである欠点を補って，高圧高周波スイッチングを生かす用途では中間回路のコンデンサで電圧を二分割するIGBT適用3レベルインバータの開発が進展している。**図3**にGTOをも含めて高耐圧・大容量化する技術として3レベルインバータ回路を示す。

さらにその上の大容量装置では，GTO変換装置が生き残ることになり，これに多相多重接続技術を付与して現状では100MVAクラスまで技術的なめどがついてきている。ちなみにこのクラスの応用装置は，新エネルギー用燃料電池分散電源，系統用無効電力補償装置などが代表的と言える。

2.4 制御技術・シミュレーション技術の進歩

これまでのアナログ制御技術に代わって，ドリフト・オフセットおよび調整作業をなくし，高精度の制御を無調整で実現するディジタル制御が主流になってきている。そしてマイクロコンピュータ，ディジタルシグナルプロセッサ

図2　高力率コンバータの回路例

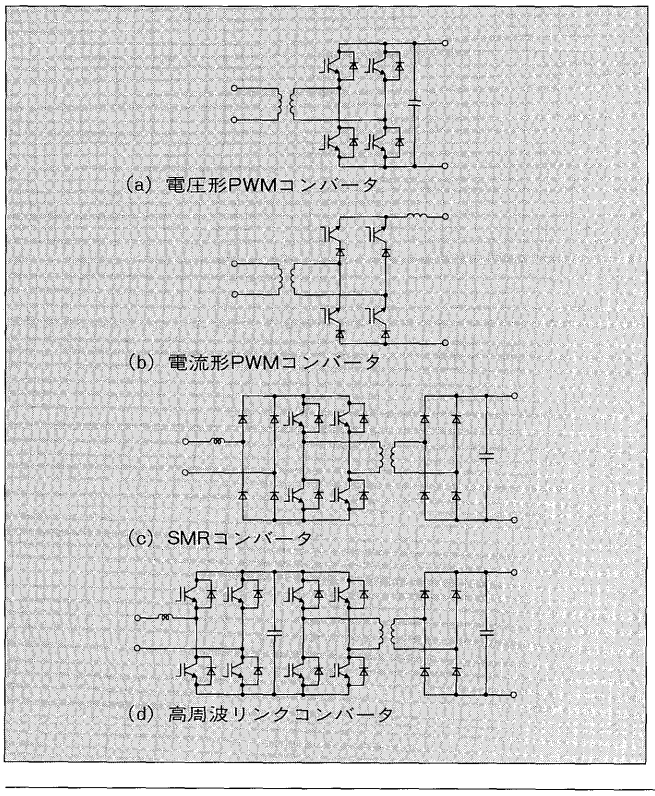
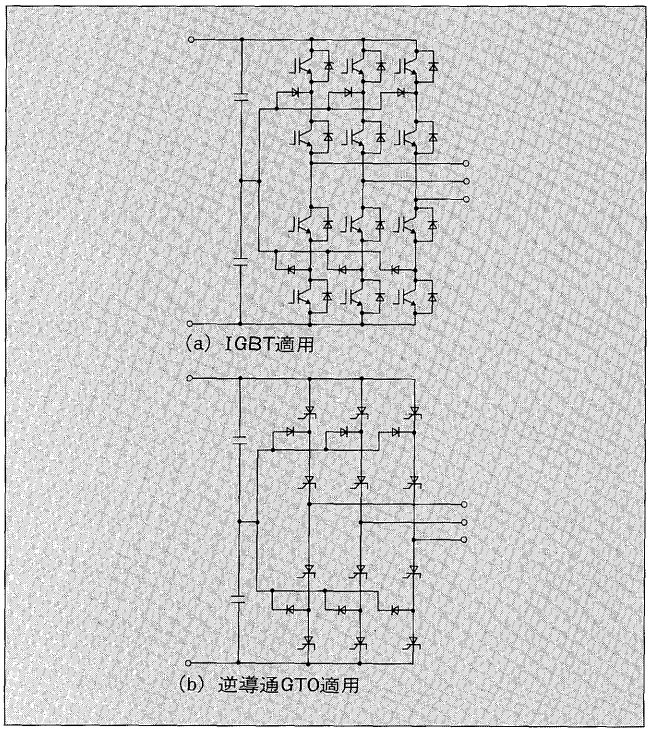


図3　3レベルインバータ回路



(DSP)，IC など最近の高性能・高機能の制御デバイスを搭載して制御装置のコンパクト化，高速化を達成している。これら全ディジタル式 DDC システムは，自己診断，並列冗長，上位系とのデータ伝送通信を満足することはもちろん，最近の制御理論をソフトウェアとして搭載してインテリジェント化が進んでいる。そのための開発支援システムも整備して，制御装置の開発期間の短縮を図っている。

最近の応用においては，各種変換装置はシステムの一部かつ重要なコンポーネントとして使用される傾向にあり，全体の特性を事前に検討評価することが求められている。また，単体の動作責務を設計段階で評価試算することも求められる。このため装置を適切にモデル化して，パーソナルコンピュータ，ワークステーションレベルで手軽にシミュレーション・解析を実施して，高調波，スイッチング損失，特性などを求めている。これにより開発設計の効率化を果たしている。

3 応用装置の現状と展望

前述のシーズ（技術）をベースとしたパワーエレクトロニクスを，ここでは応用を主体とした電源装置で再整理して富士電機の現状と動向について概説してみる。

3.1 電源装置全般

パワーエレクトロニクス製品は大別して可変速駆動装置と電源装置とになる。本稿では可変速駆動装置を除く電源装置を主体に述べている。富士電機ではこの応用分野として，情報通信分野の UPS，誘導加熱分野の高周波インバータ，産業分野の各種直流電源，新エネルギー分野の燃料電池発電用インバータ，太陽光発電用インバータ，系統分野の無効電力補償装置などを製品化している。

一般にこれら電源装置は受動負荷および系統と一体になって所望の機能，特性を発揮することが要求される。このため負荷および系統の要求仕様を取り込み，個別の変換装置の特性と最適にドッキングさせる系統連系技術，負荷整合技術などが要素技術となる。最終的には最適化技術が重要技術になると言える。電源装置の応用分野はいろいろあり，分野ごとに異なるニーズを持つことになるから，一口に電源装置と言っても個別な機能，特性をもった製品とならざるを得ない。以下ではこの多様な製品を代表的な応用分野ごとに述べる。

3.2 無停電電源装置（UPS）

コンピュータなどの情報通信機器の高信頼度電源として小容量 UPS（ミニ UPS）から中・大容量 UPS まで標準系列化している。最近の小形軽量化，低コスト化の要求からミニ UPS では MOSFET 素子を適用したトランスレス・ハーフブリッジ方式のインバータの技術開発を完了した。大容量 UPS では入力高調波・力率，出力波形などの入出力特性を改善した IGBT 適用の 1,000kVA 高周波 PWM コンバータ・インバータ方式の UPS の製品化を完了した。そして中容量まで系列拡大を行った。さらに，航空機用電源として小形軽量化の要求から IGBT を適用した出力周波数 400Hz 電源装置を製品化した。また，最近のインテリジェントビル用高品位電源として UPS 機能，ロードレベリング機能，アクティブフィルタ機能を具備した電力貯蔵形非常用電源の開発も行っている。今後の需要と普及拡大が期待される。

3.3 加熱用電源装置

加熱コイルと外付けコンデンサで共振回路を構成して，高周波の共振電流を流して金属の加熱を行う誘導加熱用電源装置の製品化を行っている。一つは業務調理用として 3～5 kW の電磁調理器がある。これは IGBT を適用して 20～70kHz の周波数で，約 93%の高い変換装置効率を得て，ホテル，レストランなどの厨房（ちゅうぼう）の清潔で安全な環境を提供するのに役立っている。もう一つの新製品として工業加熱用 50kHz，400kW インバータがある。これは配線インダクタンスを低減するために新規に開発した平形 MOSFET モジュール素子を応用している。これを用いて出力周波数は 20kHz から 100kHz まで，容量も 500 kW まで系列化している。今後さらに数百 kHz 程度までの高周波大容量インバータの需要にこたえてゆく。このほかに，パワーエレクトロニクスの適用周波数をさらに引き上げるものとして，従来真空管が用いられてきた MHz 級の誘電加熱用インバータの研究開発も実施している。

3.4 産業用電源装置

アルミめっき用直流電源として，従来はサイリスタ整流器が使用されてきた。最近の小形化，高性能化，省力化の要求から IGBT を適用した高周波リンク DC-DC コンバータ方式の直流電源を製品化した。これは高周波トランスで絶縁を行うと同時に電圧電流変換を行って要求の低電圧（数十V），大電流（数 kA），低リプルを実現している。容量も 50kW から 250kW まで系列化している。

さらに最近の入力電流の高調波規制化の動向から入力電源整流器に入力電流ひずみを抑制する 500kW 電流形 PWM コンバータの適用を行っている。さらに大容量装置のためにこれを並列多重接続する技術も開発している。

また，製鉄アーク炉用電源では従来の AC 方式に代わり，炉の自動化，省力化，電力コスト低減などから DC 方式に転換が進んできており，160kA クラスの大容量多相サイリスタ整流器が製品化されている。

3.5 新エネルギー用変換装置

地球規模の環境問題，エネルギー問題に関連して新エネルギー分野へのパワーエレクトロニクス適用が急速に進展している。オンサイト燃料電池用電源では，小形軽量化が要求されるほか，電池を含めてシステムとしての低コスト化，高効率が要求されることから高周波 PWM インバータの直接方式を採用している。容量は 50kW と 100kW が系列化された。素子はシステムの最適化から 50kW では

MOSFETを，100kWではIGBTを適用した。これは500kWまで拡大される。また，電力事業用の燃料電池発電用電源として5MW装置が逆導通GTO（4.5kV，3kA）を適用して多相多重構成方式で製作中である。さらに太陽光発電用インバータとして出力電流波形を改善して，最大電力追随制御機能，逆電圧防止機能などを付加した小形・高効率装置をIGBTの適用により製品化している。

3.6 電力系統用変換装置

電力系統の安定化，電力品質の向上などの要求から無効電力補償装置，アクティブフィルタを製品化している。このうち無効電力補償装置は，進み・遅れ双方の無効電力調整ができて装置全体の小形化，省スペース化が可能となることから，最近はGTO適用の自励式が採用される。そして大容量化と高調波低減のために多相多重接続が行われる。現在，GTO適用34MVA装置を製作中である。当面は基本波無効電力補償と不平衡補償が主体であるが，今後フリッカ補償や低次高調波補償も対象となる。

一方，アクティブフィルタは高調波障害の顕在化と規制化の動きに合わせて，高調波電流補償のために需要家端から導入が始まっている。高周波デバイスのIGBTを適用し，25次程度までの補償を対象に，補償率85%程度を目標にして50kVAから400kVAまで製品系列化している。これは高調波電流補償だけでなく，無効電流制御機能をも標準装備していることから，今後既設機器の高調波補償装置あるいは変動無効分を補償する分散配置の多機能・高性能補償装置として適用が期待される。

このほか，配電用GTO限流装置の開発も実施している。早期実用化が期待される。

3.7 その他の電源装置

上記のほか，医療機器用高圧電源，粒子加速器用高精度電源，電子ビーム用高圧電源，核融合実験用高速応答電源，レーザ用電源，電池電力貯蔵用電源など各種要求に応じた電源装置を製作している。

4 あとがき

富士電機のパワーエレクトロニクスの現状と動向について概説した。その代表的な製品装置については本特集に掲載されているので参照していただきたい。

電力エネルギーを自由自在に変換・制御するパワーエレクトロニクスは，各種応用分野の基盤技術の一つとして普及定着してきた。今後もその重要な役割を確保してますます発展してゆくものと確信する。特に21世紀における地球規模の環境問題とエネルギー問題に関連して期待されるところが多いと言える。

富士電機は今後とも技術開発の研鑽（けんさん）を積み，需要各位のニーズに対応し，ご満足いただける製品とシステムを提供してゆく所存である。関係各位の温かいご支援，ご指導をお願いする次第である。

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。