

21世紀に向けて、電気(電圧・電流・周波数)を自在に制御してエネルギーの有効利用を実現するパワーエレクトロニクスの需要はいつそう拡大し、その役割は重要性を増している。パワーエレクトロニクスのコア技術の高度化とともに、さまざまな応用製品が生まれている。産業分野では、モータ・PLC(Programmable Logic Controller)を選ばない柔軟な接続性と速度センサレスを実現したTOSVERTTM- μ /S250Wを開発した。将来の産業用ドライブ装置は機電一体化の方向にあり、圧延機とモータを一体化したロールインモータを検討している。交通分野では、低騒音化を実現するIGBT(絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ)インバータや車輪空転を防ぎ加減速性能を向上する空転再粘着制御を開発した。電力分野では、自励式変換器の適用拡大に向けた開発を進めている。家庭においても、太陽光発電インバータをはじめとして、新たなパワーエレクトロニクス機器の需要が生まれている。

Power electronics is playing an important role in ensuring the efficient utilization of electric power. Applications for power electronics are improving and expanding. For industrial applications, a new speed sensorless drive and a new "in-roll motor" have been developed. A new IGBT inverter reduces the noise of electric trains. Research and development of self-commutated converters is progressing for various power utility applications. And the photovoltaic inverter is a new type of power electronics equipment whose applications have expanded to home use.

1 まえがき

パワーエレクトロニクス技術は、エレクトロニクスと電力変換と制御の三つの技術の融合したものとわれ、サイリスタ、GTO(Gate Turn-Off thyristor)などのパワーデバイスを用いて電気(電圧・電流・周波数)を使いやすい形に変えて、自在に制御する技術である。

ここでは、まず、21世紀のエネルギー環境とパワーエレクトロニクスの役割について概観し、パワーエレクトロニクスのコア技術の最新動向と各種応用製品の動向と将来像について述べる。

2 21世紀のパワーエレクトロニクス

2.1 エネルギーを取り巻く環境

アジア地域を中心に、世界のエネルギー需要はますます増大する傾向にあり、その源となる化石燃料の枯渇とともに化石燃料の消費は環境問題とも密接に関係している。

21世紀に向けて、貴重な化石燃料を効率よく電気エネルギーに変換するとともに、電気エネルギーをできるだけ効率的に送配電し、むだなく使うことが重要となる。また、太陽光発電など新エネルギー利用の推進も必要となる。

電力の有効利用を実現するためには、電気を目的に合せて自在に変換することが必要であり、パワーエレクトロ

ニクスは今後いつそう重要な役割を担うと考えられる。

2.2 パワーエレクトロニクスの普及

パワーエレクトロニクスは、電力・産業・交通など幅広い分野ですでに用いられている。電力分野では、有効電力と無効電力の調整による電力系統の安定運用に貢献している。産業・交通分野では、交流電動機の変速駆動におけるドライブ装置の高性能・省エネルギー化に役だっている。また、高周波電流を利用する誘導加熱装置などでも欠かせない技術である。パワーエレクトロニクスの需要は、今後ますます増大し、2050年には現在の8倍になると考えられている。

3 パワーエレクトロニクスのコア技術

パワーエレクトロニクスのコア技術として、パワーデバイス、電力変換器、コントローラがある。

3.1 パワーデバイス⁽¹⁾

現状のパワーデバイスとしては、光サイリスタ、GTO、IGBTがある。例えば、GTOは6kV-6kAの素子が開発され、大容量の産業用ドライブなどに使用されている。また、電力系統用の大容量自励式変換器にも適用されている。IGBTはスイッチング周波数が高く、ゲート回路を小さくできるメリットをもち、モータドライブや電源用に用いられている。さらに大容量化を進めており、当社は3.3kV

-800 A の素子を開発中である。

次世代パワーデバイスとしては IEGT (電子注入促進型トランジスタ) がある。高耐圧・低損失で、スイッチング周波数を高くとれ、電圧駆動型デバイスであるため、ゲート回路やスナバ回路が簡単になる。並列接続も容易で電流容量も大きくできる利点がある。図 1 は 1 MVA 三相ブリッジ IEGT 変換器である。IEGT の特長を生かして従来比 1/2 の小型化を実現している。

今後は微細構造化や内部キャリアの最適制御によりシリコン材料の限界を追求するとともに、SiC や真空マイクロデバイスなど新材料、新原理のデバイスが開発される。

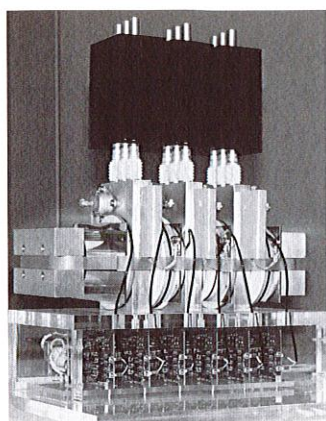


図 1. 1 MVA IEGT 変換器

次世代パワーデバイス IEGT の特長を生かして従来比 1/2 の小型化を実現した。

Prototype of 1 MVA inverter with IEGTs

3.2 電力変換器

電力変換器は交流を直流に変えるコンバータと直流を任意の交流に変えるインバータに代表される。装置の大容量化に伴ない、電源側の力率改善や高調波低減が要求されるようになり、パルス幅変調コンバータが普及してきている。

また、変換器の高効率化、小型化の要求も高く、低損失スナバ回路の開発、高密度実装技術による小型化・低インダクタンス化が進められている。

GTO などの自己消弧型デバイスをオフした際のサージ抑制回路として、スナバ回路が必要であるが、このスナバ回路でのエネルギー消費は変換器の効率を低下させる原因となってきた。図 2 はスナバ回路のエネルギーが次のスイッチングの際に自動的に主回路に戻る構成としたスナバエネ

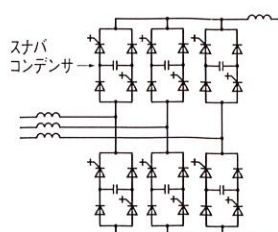


図 2. スナバエネルギー回生型電力変換器 スナバ回路のエネルギーを自動的に主回路に回生する。

Snubber loss free current source converter

ルギー回生型電力変換器を示している⁽²⁾。GTO、ダイオード各 2 個とスナバコンデンサによって 1 アームを構成しており、GTO がオンするとスナバコンデンサのエネルギーはそのまま主回路に回生される。また、従来のスナバコンデンサより容量の大きなコンデンサを使えるため、素子にかかる臨界オフ電圧上昇率が 1/10 に低減され、EMI (電磁障害) 低減にも効果がある。

図 3 は将来の電力変換器用コアパッケージ変換器である。複数の高耐圧の新デバイスをベアチップとしてセラミック基板上に並べ、さらに IC 化されたゲート回路や保護回路を内蔵させ基本モジュールとする。コアパッケージ変換器はこの基本モジュールを組み合わせたもので、直並列接続が自在である。中小容量用途には、コアパッケージ変換器をそのまま用い、大容量変換器はコアパッケージ変換器を組み合わせて多重化して使用する。

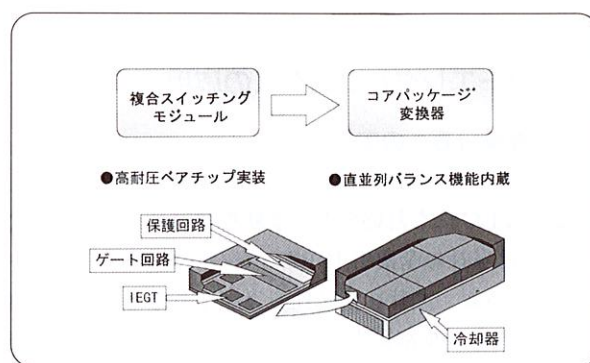


図 3. コアパッケージ変換器 ベアチップを実装し、ゲート回路や保護回路を内蔵した基本モジュールを複数組み合わせる。直並列接続も自在にできる。

Unit converter

3.3 コントローラ

パワーエレクトロニクス機器の制御には、きわめて高速な処理、周辺回路の最適化が求められる。必要な演算機能に絞ることで処理速度を向上させた 32 ビット専用プロセッサとパワーエレクトロニクス制御に特有のロジック回路やインタフェース回路を 1 チップ化したパワーエレクトロニクス専用プロセッサ PP 7 を開発した⁽³⁾(図 4)。従来 DSP (Digital Signal Processor) で 100 μ s かかっていた電流制御を 10 μ s で実行でき、従来 10 枚構成であった基板を 1 枚で実現できるようになった。広範囲のパワーエレクトロニクス機器の制御に対応しており、産業・交通・昇降機ドライブ、UPS (無停電電源装置)、燃料電池用インバータに適用されている。

将来は、さらに制御定数を同定する学習機能、機器の異常を検出・診断する自己診断機能、事故を未然に防止する予防保全機能、機器の一部が故障してもその部分を分離し

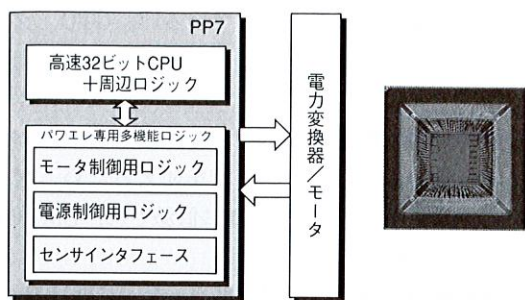


図4. パワーエレクトロニクス専用プロセッサ PP7 処理速度を向上した 32 ビット CPU とパワーエレクトロニクス制御特有のロジック回路・インタフェース回路を 1 チップ化した。

PP7 power electronics processor

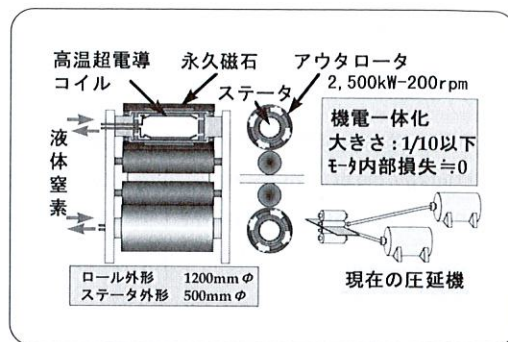


図6. ロールインモータ圧延機 バックアップロールに高温超電導コイルと高性能永久磁石を使ったモータをロールと一体化し、高効率化した。

"In-roll motor" for steel mill

て運転を継続させる適応縮退機能などを組み込んだ HA (High Availability) コントローラとして発展させる。

4 パワーエレクトロニクスの応用

4.1 産業分野への応用

産業用ドライブ装置はオープン化が進んでおり、どんなモータや PLC にも対応できる柔軟な接続性が求められている。図5は当社の産業用 IGBT インバータ TOSVERT_{TM}-μ/S250W である。柔軟な接続性を実現するとともに、速度センサレスベクトル制御を実装し、保守性の向上と用途拡大を図っている。また、オートチューニング機能により調整作業を大幅削減した。コントローラは PP7 を使用している。

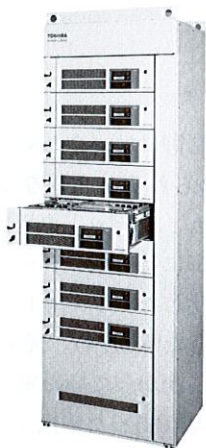


図5. 産業用 IGBT インバータ TOSVERT_{TM}-μ/S250W 柔軟な接続性とセンサレスベクトル制御により保守性を向上。また、オートチューニング機能により調整不要にした。
TOSVERT_{TM}-μ/S250W IGBT inverter

将来の産業用ドライブ装置の姿としては、モータを機械系と一体化して高効率化する機電一体化がある。図6は機電一体化の一つとして検討中のロールインモータである。圧延機のバックアップロールの中に高温超電導コイルと高

性能永久磁石を組み込み、モータと圧延ロールを一体化した。機械的な損失を最小化でき、高効率なドライブ装置を実現できる。また、大きなスペースを占めているモータスペースが不要になり、モータ・ロール間の軸振動問題も解消できる。永久磁石の高性能化は、機電一体化だけではなく、電動機の小型化、適用拡大につながる。

変換器やモータを複数台並列にして、その一部が故障した場合は、故障部分を切り離して運転継続し、装置の稼働率を向上させる HA ドライブも産業用ドライブ装置の将来の姿の一つである。

4.2 交通分野への応用

鉄道用ドライブの動向としては、低騒音化による乗り心地改善と高粘着制御による高密度運転および高速化がある。

従来 300~400 Hz で、人間にとってもっとも耳障りな周波数帯域にあったインバータのスイッチング周波数を、大容量 IGBT インバータの開発により、約 2 kHz に上げることが可能となり、大幅な低騒音化を実現した。

雨や雪などでレールの状態が変わると、鉄道の車輪は空転して駆動力がレールに十分に伝達できなくなる。この空転現象を防ぎ、天候によらずに 300 km/h の安定走行と加減速性能の向上を実現する高粘着制御を開発した。高粘着制御により、モータの駆動力が確実にレールに伝達されるため、1 編成当たりのモータ数を減らすことができ、次期新幹線のさらなるスピードアップにも貢献できる。

東京・大阪を 1 時間で結ぶ浮上式鉄道でも、パワーエレクトロニクスが駆使されている。推進コイルに可変電圧可変周波数の電力を供給する大容量電力変換器、列車自動運転のための制御装置などパワーエレクトロニクスは欠かせないものとなっている。

4.3 電力分野への応用




電気エネルギーを安定にむだなく供給するため、電力系統の広域連系・電力融通が進められている。21 世紀にはいっそう大規模な電力融通により電力の効率的な運用が図ら

れる。発電所と消費地域との距離はしだいに広がっており、長距離・大電力送電の必要性が高まっている。大電力消費地域のピーク負荷も増大を続けており、広域の電力融通によるピーク負荷への対応や超電導電力貯蔵などの電力貯蔵装置との組合せによるピーク負荷の軽減も必要である。

このような大規模な電力ネットワークの効率的運用を実現するためには、パワーエレクトロニクス機器は不可欠である。特に直流送電は長距離・大電力送電を行ううえで、また異なる系統間を非同期で連系するうえで欠かせない。今後の直流送電としては、関西電力㈱、四国電力㈱、電源開発㈱の紀伊水道直流送電（最終容量±500 kV-2,800 MW）がある。世界最大容量 8 kV-3,500 A 光トリガサイリスタの採用により、変換器は容量当たりの体積を従来の 45 %、損失を 78 % に低減した。今後さらに小型・高効率化を追求する（表 1）。

表 1. 直流送電用変換器

Converters for high-voltage DC transmission

プロジェクト	北海道/本州 (1993 年) 250 kV-1,200 A (300 MW)	紀伊水道 (2000 年) 250 kV-2,800 A (700 MW)	10 年後 250 kV-2,800 A (700 MW)
直流送電用 変換器	6(W)×3(D)×11.5(H)m 	6.65(W)×3.7(D)×8.75(H)m 	4.1(W)×3.7(D)×7.3(H)m 
体積/容量	100 %	45 %	23 %
損 失	0.45 %	0.35 %	0.25 %
700 MW 換算損失 (一般世帯 消費電力換算)	3.15 MW (1,575 世帯に相当)	2.45 MW (1,225 世帯に相当)	1.75 MW (875 世帯に相当)

電力系統用のパワーエレクトロニクス機器には、現状、サイリスタを用いた他励式変換器が広く使われている。他励式変換器は主回路構成が比較的シンプルでコストパフォーマンスの高い装置であることから今後も多くのシステムで使用されていくと考えられる。一方、GTOを用いた自励式変換器は有効電力と無効電力を独立に制御でき、系統じょう乱時も運転を継続できるなどのメリットがあり、適用拡大のための研究開発あるいは一部の導入が行われている。当社は、東京電力㈱の 50 MVA 自励式 SVC（静止型無効電力補償装置）検証試験⁽⁴⁾などの開発に参画するとともに、電力用自励式変換器の高性能化と低コスト化に取り組んでいる⁽⁵⁾。系統電圧の瞬時値をベクトルとして制御に反映させ

ることで、落雷などで系統電圧が動揺した際も、安定に運転を継続させる新制御方式を開発している。また、変換器が出力すべき電圧をベクトルとして表してスイッチングを制御することで、スイッチング回数を可変とし、定常時はスイッチング回数を減らして変換器の小型化・損失低減を実現する新制御方式を開発している。

4.4 家庭分野への応用

クリーンで無尽蔵の太陽エネルギーから発電する太陽光発電が家庭にも広がりつつある。太陽電池から出力される直流を交流に変換する太陽光発電インバータが必要となるが、当社はトランスを不要とすることで、小型・高効率化を図り、低 EMI 化を実現した家庭用太陽光発電インバータを開発した。今後は、バッテリー、フライホイールなどエネルギー蓄積要素や通信機能を利用した家庭内の電気製品の集中監視制御と組み合わせて、深夜電力の利用やピーク負荷の調整など、家庭内の電力の有効利用を実現するトータルエネルギーマネジメントとして発展する。

5 あとがき

21 世紀に向けて、電力の効率的運用と省エネルギーで環境を維持することが必要である。パワーエレクトロニクスは、高度化するコア技術で、応用機器の小型・高効率化、高稼働率を達成し、産業・交通・電力・家庭そして新分野（宇宙・海洋・地下開発など）の幅広い応用分野で、豊かな社会の実現に貢献していく。

文 献

- (1) 大橋弘道，他：次世代パワーデバイスの動向，東芝レビュー 52，2，pp. 32-34 (1997)
- (2) H. Naitoh, et al: A Snubber Loss Free Current Source Converter for High Power Use, CIGRE (1995)
- (3) 嶋根一夫，他：パワーエレクトロニクス用高機能プロセッサ PP7 の開発，平成 8 年電気学会産業応用部門全国大会，p.187 (1996)
- (4) F. Ichikawa, et al: Operating Experience of 50MVA Self-Commutated SVC at The Shin-Shinano Substation, IPEC-Yokohama '95, pp.597-602 (1995)
- (5) 斎藤涼夫，他：大容量化と電力系統への適用が進むパワーエレクトロニクス技術，東芝レビュー，51，7，pp.19-22 (1996)



斎藤 涼夫 Suzuo Saito

重電技術研究所エレクトロニクス技術開発部部長。
パワーエレクトロニクス装置の研究開発に従事。電気学会
会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.



山本 肇 Hajime Yamamoto

重電技術研究所エレクトロニクス技術開発部主務。
電力用パワーエレクトロニクス装置の研究開発に従事。電
気学会，計測自動制御学会，IEEE 会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.