

# パワーエレクトロニクスの技術動向と今後の展望

Trends in and Future Prospects for Power Electronics Technology

齋藤 涼夫 江原 実

SAITO Suzuo

EHARA Minoru

パワーエレクトロニクスが登場してから30年以上が過ぎ、電力・産業・交通分野から家庭内に至るまで幅広く使われ、安全で快適な社会を支える重要な技術となっている。

当社は、コア技術であるパワーデバイス、制御技術、冷却・実装技術、シミュレーション技術、電動機との協調などについて早い時期から研究開発を進め、高性能で品質が高く、使いやすい多くの製品を生み出して、各種の市場における顧客のニーズに応えてきた。今後とも当社の持つIT(情報技術)や解析技術を生かして、グローバル市場に受け入れられる魅力のある製品を提供していく。

More than 30 years have passed since the appearance of power electronics, and it has now become an important technology that supports a secure and comfortable society in a wide range of fields from power, industry, and transportation to home appliances.

Toshiba began research and development of power devices, control circuits, cooling systems, mounting methods, simulation technology, and coordination with motors at an early stage, and has been supplying a large number of products offering high performance, high quality, and easy human-machine interfaces. Toshiba will continue to supply market-oriented products utilizing its information technology and analysis technology.

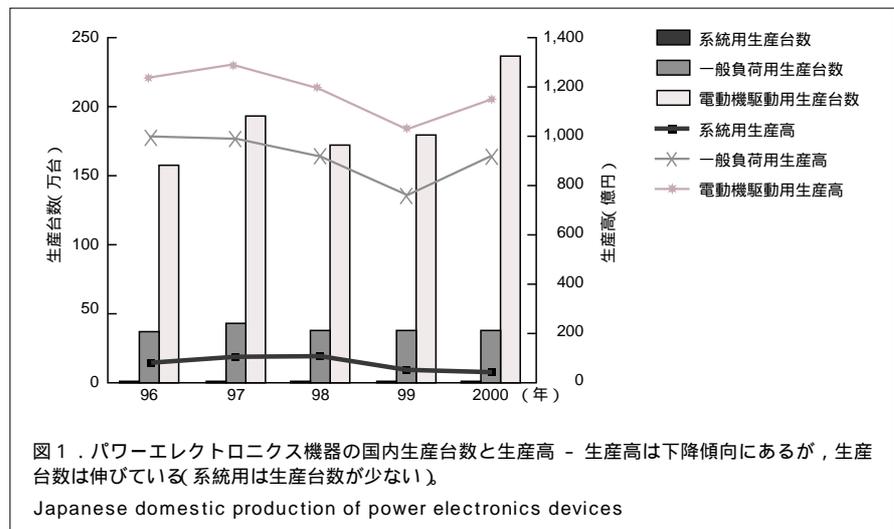
## 社会に広く浸透する パワーエレクトロニクス

電力エネルギーを効率よく、柔軟に制御するパワーエレクトロニクス技術は社会全般に広く使われている。

過去5年間のパワーエレクトロニクス製品の国内生産台数及び生産高推移を図1<sup>(1)</sup>に示す。無停電電源装置(UPS)などの一般負荷用電力変換装置、及びインバータなどの電動機駆動用電力変換装置とも生産台数を伸ばしている。一方、パワーエレクトロニクス全体の生産高は機器の小容量化と価格低下により下降傾向にある。

## 多様化する市場のニーズ

パワーエレクトロニクスに要求される機能は、市場・分野によって多様化している(表1)。



## 省エネルギー、高効率化

最近の環境に対する意識の高まりから、自然エネルギーを活用できる太陽光発電や風力発電が注目を浴びている。パワーエレクトロニクスは、クリーンエネルギー活用のキー技術としての役割を期待されるとともに、装置自体

の変換効率の向上、エコマテリアルの使用やリサイクル性の向上などによって地球環境に優しい装置への転換を求められる。

## 高信頼性、高稼働率

電力、通信、交通のような公共性の高い社会インフラストラクチャシステム

表1. 各市場において求められるニーズ  
Needs for power electronics in various markets

課題	市場					関連する技術
	電力インフラストラクチャシステム	通信インフラストラクチャシステム	一般産業	交通・運輸	オフィス・家庭	
省エネルギー・高効率化	損失低減, 電源分散化, クリーンエネルギー	損失低減	損失低減	高効率, 交流電動機化	損失低減, クリーンエネルギー	電動機可変速, 分散電源, 電力用半導体
快適性			性能向上, 省スペース	低騒音, 乗りごち	低騒音	シミュレーション技術, 制御技術
高信頼性	無停止	無停止	品質向上	安全性, 品質向上	無停電, 安全性	UPS, 回路技術, 品質管理
環境との調和	高調波抑制	電磁ノイズ抑制	高調波抑制, 電磁ノイズ抑制	電磁ノイズ抑制	電磁ノイズ抑制	無効電力補償装置, 電磁気環境両立性

においては、特に高信頼性と安全性が重視され、パワーデバイス、装置、システムの各レベルにおいて、品質向上、無停止化、フェイルセーフ化が求められる。

また、関連する装置と連携した全体システムの信頼性や稼働率向上への取組みにより、初期のコスト削減だけでなく、導入から廃棄までの全稼働期間を通じたTCO (Total Cost of Ownership) のミニマム化への要求が強い。

### ■ 周囲環境との調和

個人の生活と深くかかわるオフィス・家庭や公共の場のように、様々な装置が共存する生活空間では周囲環境とパワーエレクトロニクスとの調和が重要である。周囲の電子機器の誤動作や通信障害を避けるためには、発生する電源高調波や高周波ノイズの抑制が求められる。

環境との調和を評価するためには、国際規格への対応が必要である。

### ■ 機器性能の向上

ドライブ装置では、速度センサ付きベクトル制御から速度センサレスベクトル制御への移行が進んでおり、センサレスでの低速運転性能やトルク特性の向上が求められている。

また、電動機の実験データに基づいて、速やかにドライブ装置のパラメータ

設定を行うことができるオートチューニング機能の高度化により、運転立上げ期間の短縮が期待される。

### ■ ネットワークのオープン化

これまでにネットワークを活用したUPS遠隔監視が行われているが、今後はパワーエレクトロニクス機器を含めた各種設備の状態監視、保守診断、故障時の速やかな復旧などを目的として、広域での有線・無線ネットワークの構築が求められる。

この特集では、このような使われる立場での多様なニーズに焦点を当て、それぞれの課題に対する当社の取組みについて述べる。

## パワーエレクトロニクスで 開く新しい世界

パワーエレクトロニクスの持つ幅広い特長は、多くの分野に生かされ多様なメリットを生み出している(図2)。

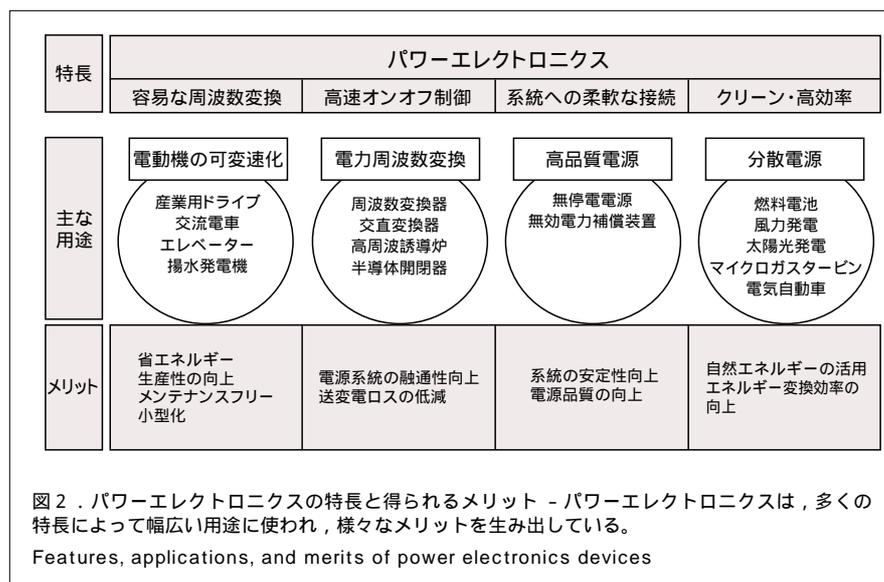
従来、直流機が使われていた鉄鋼圧延機、プロセスライン、抄紙機などのラインドライブシステムでは、国内においてはほぼ交流機によるドライブシステムに置き換わり、保守の簡素化、制御性能の向上が図られた。

製品の低廉化に加えて、製品品質の向上、システム効率の向上、長寿命化が進んだ結果、初期コストだけでなく、運転コスト、故障対応コスト、補修コストの低減が図られた。

図3はTCOの視点から、この低減傾向を示したものである。

ファン、ポンプの可変速化による省エネルギー効果は早くから注目され、広い容量範囲において電動機が可変速化されてきており、更に高圧電動機を出力変圧器なしで直接駆動する高圧インバータの適用が拡大しており、据付面積の縮小、配線工事の簡素化が図られている。

パワーデバイスの進歩も著しく、中小容量領域ではIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の容量拡大や低損



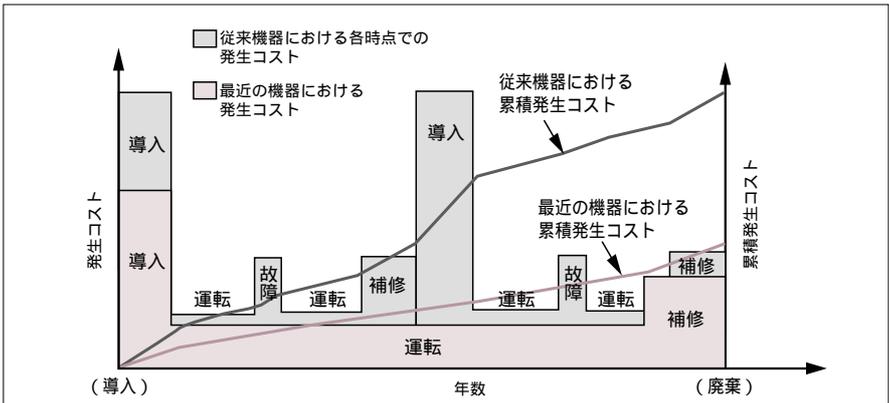


図3．機器のライフサイクルと発生コスト - 機器の品質向上，長寿命化によって，ライフサイクル全体でのコスト最小化を図ることができる。  
Reduction of total cost of ownership (TCO) by high quality, high efficiency, and long equipment life cycle

失化が進み，大容量領域では IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) などの大型パワーデバイスの開発・実用化に伴い，装置の小型化，効率向上を実現している。

電力分野における揚水発電所の発電電動機駆動装置，50/60 Hzの周波数変換装置や，直流送電用の電力変換装置なども光サイリスタなど大電力用パワーデバイスの進歩により実現されたものである。

最近，情報通信設備の利用は大きく広がり，計算機，通信機器，データベースサーバなどの電源の停電や瞬時電圧降下による設備停止の社会的な影響は計り知れない。

これらの影響を最小にするために，データセンターや通信センター用の2～3MVAクラスの大規模な冗長系UPSシステムから，オフィスの個別サーバ用小型UPSまで，多くの高品質電源が使用されている。

太陽光発電，風力発電，燃料電池などクリーンエネルギー用の電力変換装置や電池などによるエネルギー蓄積装置など，電圧や周波数が変動する電源から最適な電力や動力を取り出すのもパワーエレクトロニクスの重要な役割である。

機器をネットワークで結び，電話回線，PHS，インターネットなどを用いて常

時機器の状況を監視する遠隔監視システムや，異常発生時の速やかな情報伝達システムが実用化されようとしている。

このようにパワーエレクトロニクスにおいては，電力変換装置としての役割に加えて，エネルギー管理を支えるキーコンポーネントとしての役割が重要になっている。

**新しい課題と対策**

電源システムに多くのパワーエレクトロニクス機器が接続される場合の課題と対策の例を表2にまとめた。

パワーエレクトロニクスでは，電流を断続的にスイッチングして電力制御を行うため，配線ケーブル上及び周囲空間に対して高調波成分ないしはキャリア周波数成分を持つ電流，電磁波，騒

音を発生する。

これに伴って，電源側へ流出する高調波は同じ系統に接続される力率改善用コンデンサなどの他機器に対して，加熱，振動，騒音の増大などの影響を与える可能性がある。

また，周囲空間への電磁波の放出は，他の電子機器や通信機器に対して電磁ノイズや誤動作などの影響を与える懸念がある。

これらの発生のメカニズムや影響の程度が明らかになるにつれて，発生する側にフィルタやノイズキラーなどを付けて高調波成分を低減する，影響を受ける機器の耐量を向上させる，接地方式を改善する，などの対応手段の検討が進み，系統，用途，据付条件などを考慮した十分な対策を取れるようになってきた。今後は解析モデルに基づいて，あらかじめ発生の予測と対策を提示できるように継続して開発を進めている。

以下に，実例を紹介する。

- (1) 騒音(電動機磁気騒音) インバータのキャリア周波数に起因する電動機磁気騒音は，キャリア周波数を上げることで低騒音化が可能であるが，EMI(電磁干渉)ノイズなどとトレードオフの関係にある。騒音のピーク値を低く抑えるため，騒音の周波数成分を分散させる，まるやかPWM(パルス幅変調)制御を採用している汎用インバータがある。

表2．パワーエレクトロニクス化に伴う課題と対策  
New issues and countermeasures in applying power electronics technology

現象	原因	影響	対策
電源高調波	整流回路，アーク炉	力率改善コンデンサ/変圧器加熱，リレー誤動作	高調波フィルタ，変圧器の二次側巻線位相シフト
電磁ノイズ	伝導，誘導，放射	通信回線，放送機器へのノイズ	ノイズフィルタ，シールドケーブル，配線方法の改善
電磁気騒音	PWM制御	高周波騒音	周波数アップ，周波数分散，吸音構造
漏れ電流	電磁アンバランス，コモンモード電圧変動	軸受損傷(電食)	CMT，軸絶縁，等電位接地
サージ電圧	電圧の高速スイッチング，インバータ・電動機間配線	電動機巻線絶縁損傷	出力フィルタ，絶縁強化

(2) 電食 電動機自身の磁気的アンバランスに伴う電食に加えて、パワーデバイスのスイッチングの高速化に伴い、インバータ主回路構成、電動機・機械の接地状況などの複合要因が重なって発生する軸電圧が、電動機や機械の軸受に損傷を与えるケースがある。従来のアースブラシや軸受部での軸絶縁などの対策とあわせて、コモンモードトランス(CMT)の設置(囲み記事参照)や同電位接地工事が有効である。

(3) サージ電圧 パワーデバイスのスイッチングの高速化によって電動機巻線端に発生するサージ電圧の問題は、IGBTが採用され始めたころから顕在化している。

汎用インバータにおける対応策として、出力側にリアクトルを挿入したり、配線長や敷設方法に関係なく効果が得られるサージ抑制フィルタをラインアップしている。

## パワーエレクトロニクスを支える技術

### パワーデバイス

当社は、パワーエレクトロニクス装置の心臓部であるパワーデバイスについては、MOS( Metal Oxide Semiconductor )化を基本コンセプトとして開発・シリーズ化を進めている。

大容量用のIEGTでは、プレーナ型IEGTチップの特性改善を図りながら、圧接型・モジュール型IEGTのシリーズ化を拡大している(表3)。更に、トレンチ型IEGTチップによる特性改善の研究開発を進めている<sup>(2)</sup>。

中低耐圧パワーデバイスであるIGBTでは、当社独自の小型モジュール型パッケージ構造を持つCompact-IPM( Intelligent Power Module )シリーズを完成した(図4)。ここでは、高熱伝導度基板を採用することにより、当社比で従来の約1/2という低熱抵抗を達成し、装置の小型化に貢献している。

更に、シリコンパワーデバイスの性能限界が指摘されているなか、当社はSiC(炭化けい素)パワーデバイスをターゲットとした国家プロジェクトに参加して要素技術開発を行うとともに、ダイオード、スイッチングデバイスの研究開発を進めている。

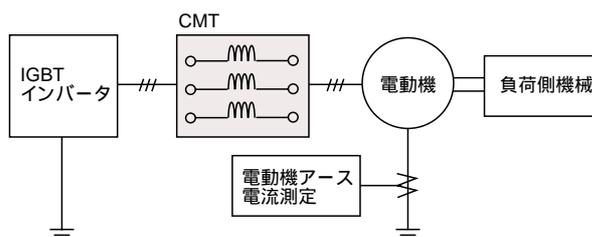
表3 高圧大電流 IGBT/IEGT のシリーズ化  
Series of high-voltage, large-current power devices

コレクタ・エミッタ間 電圧(V)	コレクタ電流(A)		
	600 ~ 900	1,000 ~ 1,200	1,500 ~ 2,100
1,700		MG1200V1US51	
2,500		ST1000EX21	
3,300	MG800FXF1US53	ST1200FXF21 MG1200FXF1US53	
4,500	MG600GXH1US53 MG900GXH1US53	S6X06( 1,200A )	ST1500GXH22 ST2100GXH22A

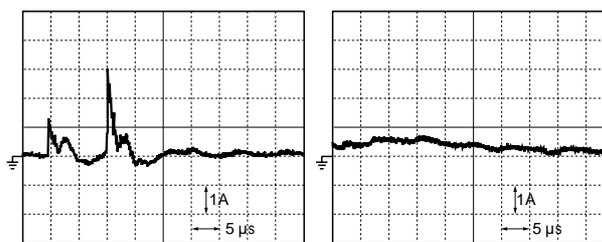
MG はモジュール型, ST と S6X06 は圧接型  
S6X06と AはIEGT, 他はIGBT

## CMT 導入の効果

インバータで駆動される電動機において、中性点電位(コモンモード)の急峻な変動がアース電流増加を助長する要因と考えられる。この抑制手段として、CMTを実用化した(図(上))。トランスの結線方法はいくつかのバリエーションがあるが、主回路電流が流れる三相3線を磁気結合する方式がもっとも簡易な結線方式である。その効果を電動機アース電流の変化として示す(図(下))。



CMTのシステム構成 - インバータと電動機の間に入挿されたCMTがコモンモード電位変動の影響を抑制する。



電動機アース電流の抑制 - CMTの設置により電動機のアース電流を大きく抑制することができる。

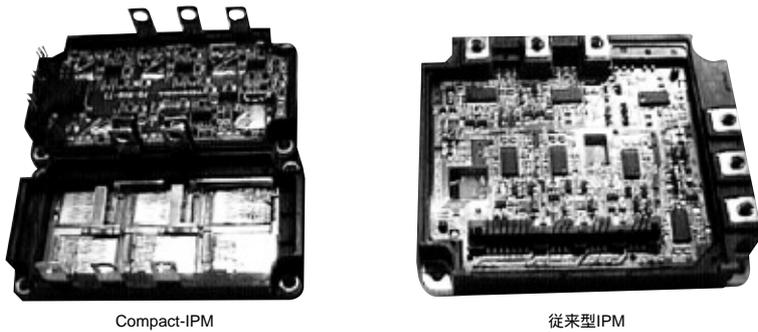


図4. Compact-IPM - チップとベース間に高熱伝導性セラミック基板(SiN)を採用し、熱抵抗を約1/2(当社従来比)に下げ、小型・薄型化を達成した。  
Compact intelligent power module (IPM)

### ■ パワーデバイス応用技術

パワーデバイスを使いこなし、装置の小型化を達成するためには、実装冷却技術が重要である。例えば、冷却の高性能化のためには衝突噴流による低熱抵抗化、温度均一化の改善、冷却における低騒音化のための冷却ファンとヒートシンクの組合せの工夫、あるいは環境に優しい冷却としてはアルミニウム・フロン組合せから、銅のヒートシンクを使った水冷方式への転換などの研究開発を行っている。

一方では、部品が高温で使えることも小型化につながるため、高温環境でも使えるセラミック基板、部品・回路の研究開発を行っている。また、試作回

数を減らして開発期間の短縮を図るため、温度解析技術の高度化だけでなく、温度・応力解析技術の向上が必要であると考えている。

### ■ 主回路・制御技術

もっとも簡易なダイオード整流回路は、低コストではあるが高調波が大きいという短所があるため、電源電流を正弦波にするPWM制御コンバータ方式が多く用いられる。当社は高調波が少なく、安価である中性点チョップ方式整流回路を実用化<sup>(3)</sup>、更に18相整流回路方式、アクティブDCL(直流リアクトル)回路方式(図5)などEMIの少ない変換回路の研究開発も進めている。

電動機速度センサを省略できるセ

ンサレス制御方式は、単に低コスト化にとどまらず、システムの信頼性を向上できる制御方式として注目されている。過酷な使い方となる鉄道・自動車応用に対してもこのセンサレス制御方式が適用できるように制御方式の研究開発を進めている<sup>(4)</sup>(図6)。

### ■ 専用プロセッサ

当社は、これまでに大容量用パワーエレクトロニクス専用32ビット高性能マイクロプロセッサPP7を開発し、多くの装置に搭載して、制御の高度化、高速化、制御資産の継承などを図ってきた。このたび、中小容量用PP7を完成し、演算実行速度、計算機能、メモリ容量の強化を図った。今後とも専用マイクロプロセッサによる高性能・高信頼製品の開発を行っていく。

### ■ IT・コンピュータ技術

装置の保守監視、遠方診断などにITの適用が進んでいる。しかし、運転中に詳細な監視データをリアルタイムに送ろうとするとデータ量が膨大となるという課題があった。今後は装置側で収集したデータに処置・判断を施し、必要に応じて、監視データ、異常信号を送る方式を検討している。

### ■ 品質確保

パワーエレクトロニクス装置にとっては、パワーデバイス自身あるいは使い方に関する信頼性の確保が重要である。

特に、長期間使用時の信頼・耐久性を確保するため、パッケージ構造やボンディング方法を検討し、応力やはんだクラックの研究開発を続けている。

### ■ グローバルな生産・販売体制

市場がオープン化し、国際規格への対応、グローバルな部品・機器の調達、国際的な先端技術のタイムリーな採用など、メーカーとしてのグローバル化が

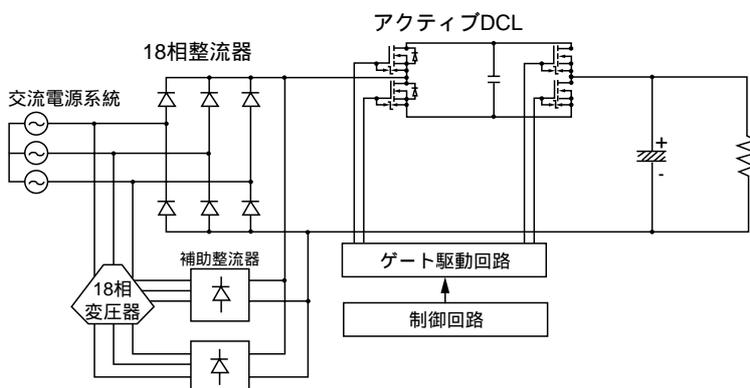
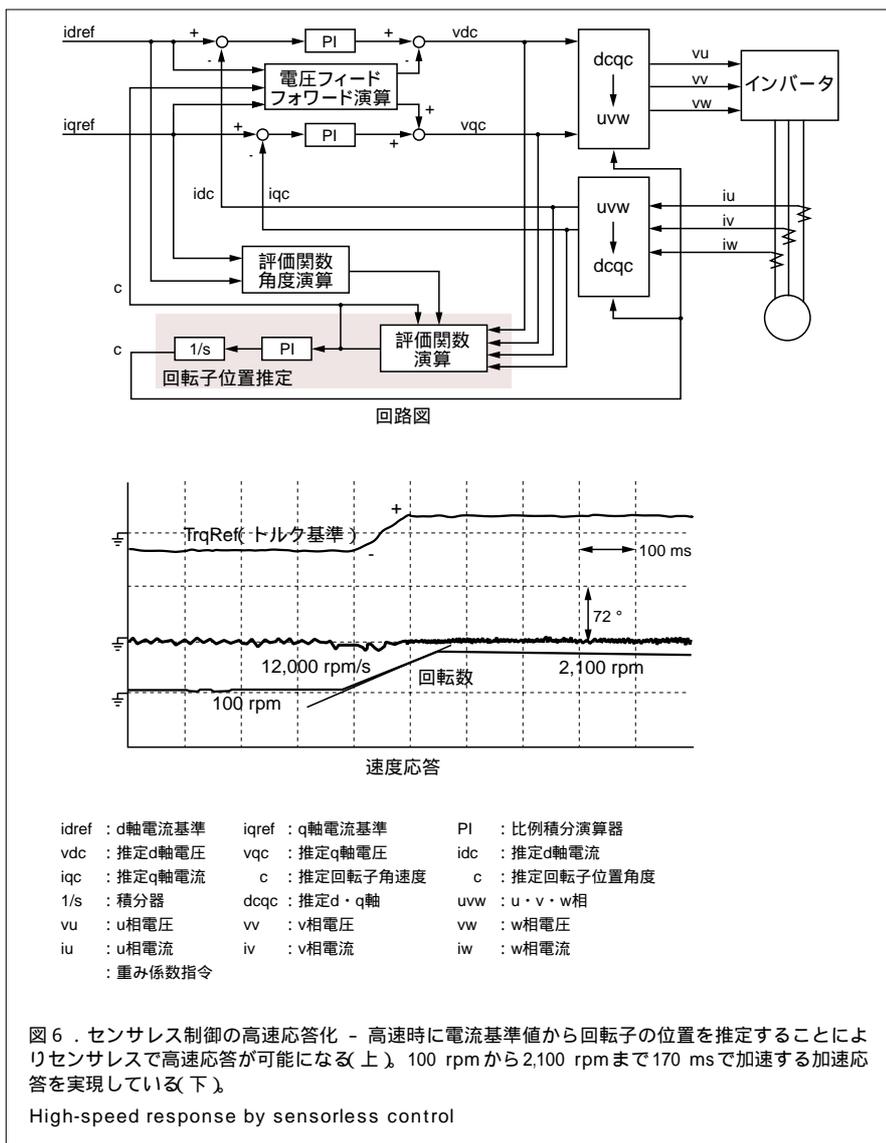


図5. 18相高性能整流回路による高調波低減 - アクティブDCL回路付き18相整流回路は、PWM制御IGBTコンバータと比較して高効率、低EMIであり、電源高調波をガイドラインレベルに抑制できる。

18-pulse converter with active DC reactor for reduction of high harmonics



求められている。

当社は、1971年に米国のヒューストンに重電関係の生産拠点を設立し、88年から汎用インバータの生産を開始し、小型UPS、産業用ドライブ、交通用ドライブへと拡大を図ってきている。

2000年10月にはGE社との合併会社を設立し、日米を拠点に両社の技術力

を集結して産業用ドライブシステムのグローバルな販売、エンジニアリング、サービス体制を構築している。

また、2001年4月にはフランスのシュネデル・エレクトリック社と汎用インバータの開発・製造の合併会社を設立し、日仏の2拠点でグローバルな活動を行っている。

当社は、早い段階から生産・販売・エンジニアリングのグローバル化と、海外トップ企業とのアライアンスを進めている。このようなグローバルな研究開発、生産、アフターサービス体制により、幅広い顧客のニーズに合った商品、及びサービスを提供できるものと確信している。

## 文献

- (1) 機械統計年報第一部生産動態統計平成12年・経済産業省経済産業政策局調査統計部編・2001-6, 272p.
- (2) 斎藤涼夫,ほか. パワーエレクトロニクス技術の動向. 東芝レビュー. 55. 7. 2000, p.2-6.
- (3) 餅川 宏,ほか. "三相整流器の電源高調波低減回路". 平成12年電気学会全国大会講演論文集. 4, 2000, p.1378.
- (4) 中沢洋介. 永久磁石リラクタン্সモータの回転センサレス制御. 電気学会自動車研究会. 2002.



斎藤 涼夫  
SAITO Suzuo

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター技監。パワーエレクトロニクス技術の研究開発に従事。IEEE、電気学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center



江原 実  
EHARA Minoru

社会インフラシステム社 パワーエレクトロニクスシステム事業部参事。ドライブシステムのエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。技術士(電気・電子部門)。  
Power Electronics Systems Div.