

パワーエレクトロニクス機器技術の現状と展望

Power Electronics Technology: Current Status and Future Outlook

河野 正志 KAWANO Masashi

廣瀬 順 HIROSE Jun

藍原 隆司 AIHARA Takashi

富士電機は、エネルギー分野で世の中に貢献するために電気を自在に操るパワーエレクトロニクス（パワエレ）に注力している。パワエレ機器は、回路技術・制御システム・パワー半導体をベース技術としてさまざまな分野で発展を遂げている。インバータでは、機能安全規格対応をはじめ、EMC 解析技術、高速同期通信技術などを適用した。UPS では、ニッケル水素電池の搭載や A-NPC3 レベル変換技術を適用した。このほか、鉄道車両用や電気自動車用のパワエレ機器、高効率サーバ用電源および大容量 PCS など、多岐にわたってパワエレ技術を展開し、安全化・小型・省エネ化などの要求に応じている。

Fuji Electric is focusing on power electronics, through which electricity can be handled flexibly, to contribute to the world in the field of energy. Power electronic devices, with circuit technique, control system, and power semiconductor as their base technologies, are expanding into various fields. For inverters, EMC analysis technology, high-speed synchronization communication technology, and water-cooling methods etc. are employed in addition to complying with functional safety standards. For UPS, nickel-metal hydride batteries are introduced and A-NPC 3-level conversion technology is adopted. In addition, Fuji Electric is developing a wide range of power electronics technologies to enhance power electronic devices for railway vehicles and electric cars, high-efficiency power sources for servers, and high-capacity PCS and responds to various demands such as safety, miniaturization and energy saving.

1 まえがき

富士電機は、エネルギー分野で世の中に貢献するために電気を自在に操るパワーエレクトロニクス（パワエレ）に注力している。パワエレの応用分野は、産業用可変速駆動・産業用電源・太陽光発電・誘導加熱装置・電鉄用電機品・自動車関連電機品など多岐にわたる。これらを支えるパワエレ機器のみならず、その重要部品であるパワー半導体および受配電制御機器の製品群も提供しており、強力なコンポーネントとそれを適用した強力なソリューションを各分野で提供している（図1）。

パワエレ機器は図2に示すように、それぞれの分野で持続性社会の実現に貢献している。回路技術・制御システム・パワー半導体をベース技術としながら各アプリケーション分野で市場要求を取り込み、その分野独自の発展を遂げている。

本稿では、それぞれの分野でどのような要求にどう応え

ているかという視点でパワエレ機器の技術動向と製品開発の現状を紹介する。

2 市場ニーズと技術のトレンド

図3に市場ニーズと製品技術および製品に用いられるパワー半導体・受配電制御機器・基礎技術・解析技術の変遷を示す。

市場要求に応えるために、必要な製品技術を開発してきている。中でも、新しい製品に必要なパワー半導体や受配電制御機器を自社で開発していることが特徴的である。具体的には、省エネルギー（省エネ）・省スペースを実現した A-NPC3 レベル適用高効率 UPS では、RB-IGBT (Reverse-Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor) や RB-IGBT を含む A-NPC (Advanced Neutral-Point-Clamped) 3 レベルインバータ回路を一体化した専用モ

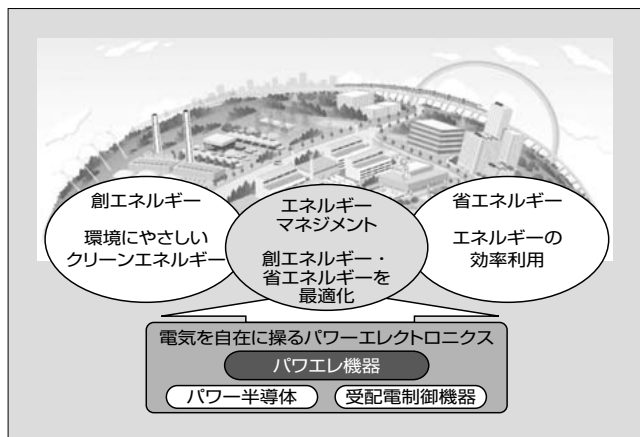


図1 パワエレ機器の位置づけ

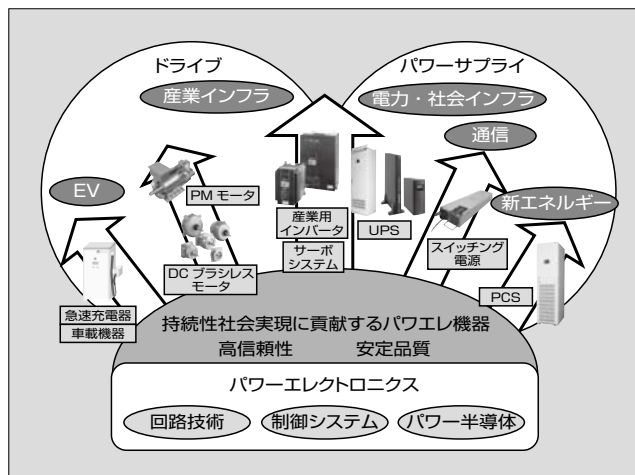


図2 パワエレ機器の事業領域

項目	(年)			
	2000	2005	2010	2015
市場ニーズ	<ul style="list-style-type: none"> ○安全規格（低電圧, EMC）対応 ○ネットワーク対応 ○省エネルギー ○データセンター向け電源（省エネ, 省スペース） ○メガソーラー（海外） 		<ul style="list-style-type: none"> ○機能安全規格対応 ○高機能ドライブ ○省エネ法改正 ○メガソーラー（国内） 	
製品技術	<ul style="list-style-type: none"> ○ネットワーク対応 		<ul style="list-style-type: none"> ○機能安全規格対応 ○高速ネットワーク対応 ○高効率 PM モーター ○SiC 適用インバータ ○A-NPC3 レベル 高効率 UPS ○A-NPC3 レベル 高効率 PCS 	<ul style="list-style-type: none"> ○安全バス対応 ○SiC 適用 UPS ○SiC 適用 PCS
パワー半導体		<ul style="list-style-type: none"> ○RB-IGBT 	<ul style="list-style-type: none"> ○A-NPC3レベル用モジュール ○SiC デバイス 	
受配電制御技術			<ul style="list-style-type: none"> ○直流配電技術 	
基礎技術, 解析技術	<ul style="list-style-type: none"> ○EMC 解析技術（回路網） ○フィールドバス技術 ○NPC3レベル回路技術 	<ul style="list-style-type: none"> ○EMC 解析技術（3D） ○PM モーターセンサレス駆動 ○A-NPC3レベル回路技術 	<ul style="list-style-type: none"> ○機能安全規格対応 ○高速通信技術 	<ul style="list-style-type: none"> ○安全バス技術

図3 パワエレ製品技術のトレンド

表1 製品と対応安全機能

製品名称	対応安全機能			
	STO	SS1	SLS	SBC
FRENIC-Multi	○			
FRENIC-MEGA	○			
FRENIC-VG *	○	○	○	○

STO : Safety Torque Off
 SS1 : Safe Stop 1
 SLS : Safely Limited Speed
 SBC : Safe Brake Control
 *SS1, SLS, SBCはオプション対応

ジュールの開発を行っている。また、メガソーラーなどに使用されるパワーコンディショナ（PCS）には直流配電機器の開発を行っている⁽¹⁾。

このようにパワエレ機器は、パワー半導体や受配電制御機器の技術革新を牽引（けんいん）する役割を担いながら、要素技術開発や製品開発を通して、各分野でソリューションに貢献する強力なコンポーネントを提供している。

3 要素技術の開発動向と製品開発の現状

3.1 各分野での要素技術の開発動向

(1) ドライブ製品の安全規格対応技術

機械類が関与する人身事故の防止などを目的として、機械システムのリスクアセスメントが行われるようになり、さまざまな規格化が進んでいる。特に、ドライブ製品（Power Drive System）の安全規格が IEC 61800-5-2 に制定されている⁽²⁾。

富士電機は、この機能安全規格に対応した製品を開発している。表1に示す富士電機のインバータ製品は SIL2（ISO13849-1 のカテゴリ 3, Performance Level d 相当）

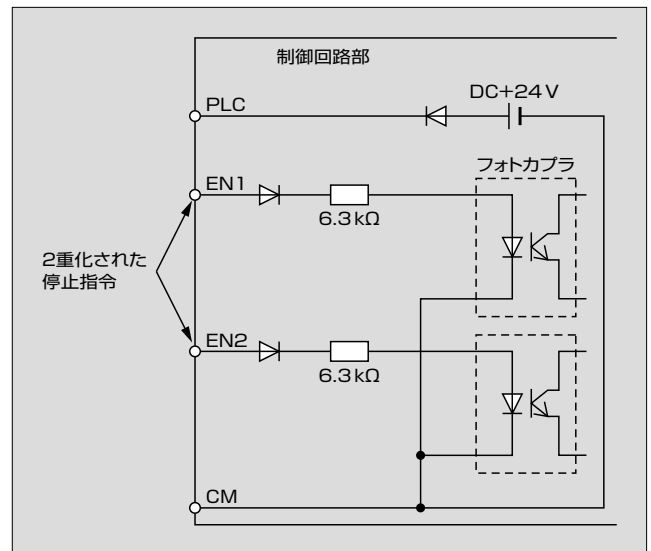


図4 STO入力回路

に対応している。

STO 機能は、図4の回路に示すように2重化された停止指令をインバータ内部でも2重化した回路で処理することで故障率を低減するとともに、回路故障を検知するための診断機能を備えている。

今後は、対応機能の拡大や安全バスに対応していく。

(2) EMC シミュレーション技術^(注1)

グローバル化に伴い、汎用インバータの EMC 対策は製品開発において必須であり、設計段階からどのように対策するかを検討する必要がある。ノイズには伝導ノイズと放射ノイズがある。伝導ノイズについてはかなり詳細な構造

<注1> EMC : 放射・電導ノイズに関する性能

との関係性まで見極めることができるようになってきている。

図5のような三次元CADデータからEMCシミュレーションに必要な電気パラメータ（結合容量、浮遊容量、浮遊インダクタンスなど）を電磁界解析によって導出し、回路網で雑音端子電圧を精度良くシミュレートすることができるようになってきた。図6は、シミュレーション精度の改善で解析結果がより測定結果に近づいたことを示しており、その精度は実用上十分なレベルになってきている。これにより、構造設計の初期の段階からEMC対策を盛り込むことができ、製品開発期間の短縮につながっている。

今後、シミュレーション活用によるフロントローディング化が進む。

(3) 高機能ドライブシステムにおける高速同期通信技術

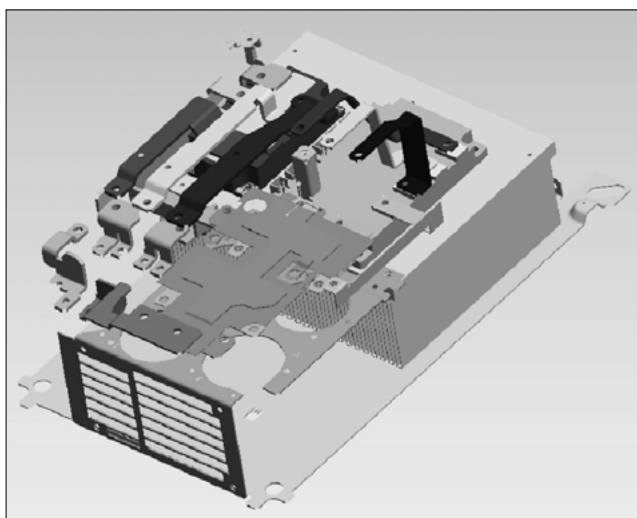


図5 EMC解析用三次元モデル

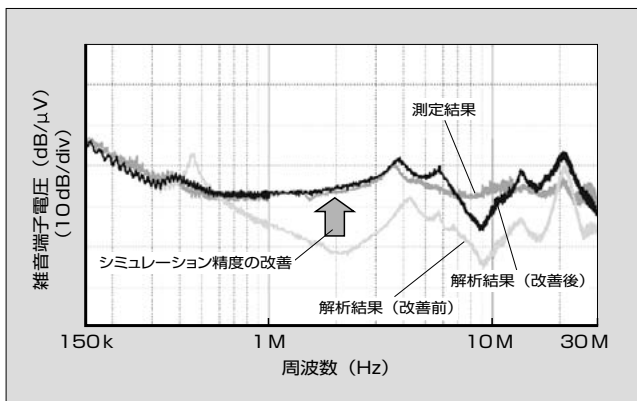


図6 インバータにおけるEMCシミュレーション

表2 「E-SXバス」の概略仕様

項目	仕様
通信速度	100Mbits/s
軸間同期精度	±1μs以下
距離（局間、総延長）	100m, 1km
タクト周期	最小0.25ms

鉄鋼圧延、製紙ライン、自動車試験機などの高精度・高機能ドライブを行う分野では、単にインバータ性能だけでなく、システム全体としての機能・性能の実現が重要である。そのような中、コントローラとバス結合したシステム制御を行ってきたが、さらに通信の高速化と同期性の向上が必要になってきている。

高性能ベクトルインバータ「FRENIC-VG」は、統合コントローラ「MICREX-SXシリーズ」の新CPUモジュール「SPH3000MM」に搭載している「E-SXバス」に対応させた。このバスは、Ethernet技術を応用した高速通信で、プラントの多軸高速制御や印刷機の高精度同期制御駆動などが可能になる。E-SXバスの概略仕様を表2に、適用例を図7に示す。

今後は、モーション制御まで含めた高機能ドライブへと発展していく。

(4) SiCデバイス適用技術⁽⁴⁾

パワー半導体の新しい素材としてSiC（炭化けい素）やGaN（窒化ガリウム）などを用いたパワー半導体の開発が進んでいる。これらの材料は表3のような特徴を持っており、それを生かした使い方の開発が必要である。

この特徴から派生して、例えば周辺回路のリアクトルが小型化されたり、低騒音になったりする可能性もあり、さまざまな応用分野が考えられる。

また、インバータ主回路には図8に示すようなダイオー

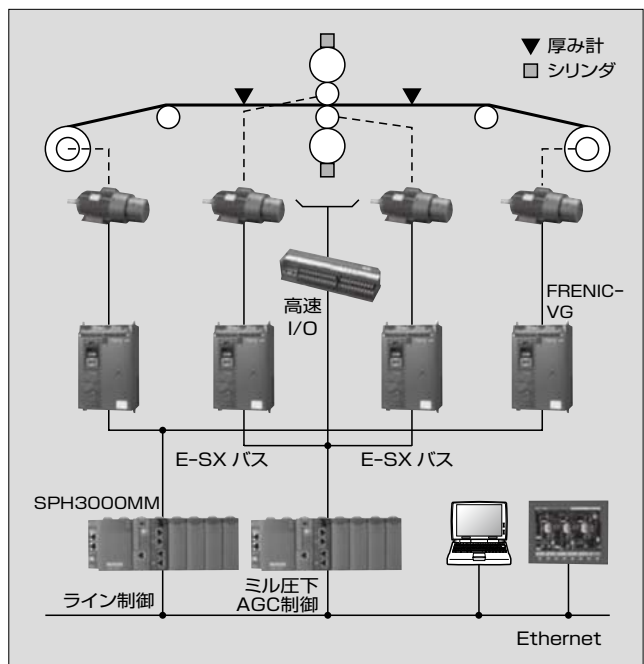


図7 「E-SXバス」による高速制御システム例

表3 SiC・GaNデバイスの特徴

特徴	活用方法
損失が少ない	キャリア周波数の高周波化 低損失化、高効率化
高温動作が可能	より高温環境での使用が可能
高耐圧化しやすい	高圧デバイスの小型化

ドとトランジスタを使用している。このダイオードだけをSiCに置き換えたハイブリッドモジュールと、全てをSiCに置き換えたAll-SiCモジュールとがある(表4)。

富士電機では、このハイブリッドモジュールを適用した高効率インバータ「FRENIC-MEGA GX-SiC」を開発した。従来機種に比べて損失を25%低減できており、高効率同期モータ「GNSシリーズ」「GNPシリーズ」との組合せでさらに高効率なドライブシステムが実現できる。

All-SiCモジュールでは、大幅な損失低減が可能であり、高効率だけでなく小型化できることを実証した。

(5) A-NPC3レベル変換技術⁽⁵⁾

無停電電源装置(UPS)やPCSなどの変換装置は、高効率化が大きな課題である。その実現手段として、図9に示すようなA-NPC3レベル変換回路を開発した。本回路は、スイッチング損失が従来の2レベルに対し半分になるだけでなく、高調波電圧が低減されリアクトルやコンデンサといったフィルタ回路の損失も低減するので、装置の小型化も可能となる。なお、3レベル変換回路には富士電機が開発したRB-IGBTを適用したA-NPC3レベルIGBTモジュールを使用し、さらなる損失の低減を図っている。

(6) 蓄電池の評価・適用技術

UPS用に限らず蓄電に対するニーズは広がりを見せている。一方、従来の鉛蓄電池に替わる新しい蓄電デバイスとして、特に、EVやHEV用としてリチウムイオン電池

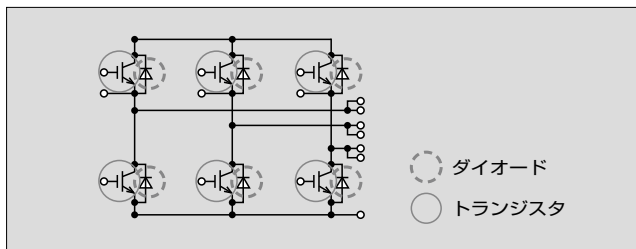


図8 インバータ主回路内部構成

表4 SiC適用モジュールの種類

モジュールの種類	ダイオード	トランジスタ
ハイブリッドモジュール	SiC	Si
All-SiCモジュール	SiC	SiC

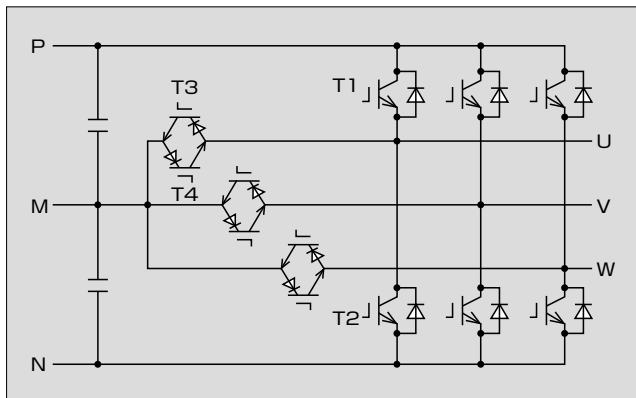


図9 A-NPC3レベル変換回路

が実用化されつつある。富士電機は、各種リチウムイオン電池の特性や寿命の評価だけでなく、最終ユーザの視点に立った安全性や信頼性評価の独自技術を確立している。この結果、リチウムイオン電池適用製品の開発期間、評価期間の短縮が可能となった。

3.2 製品開発の現状

(1) 用途別インバータ

汎用インバータと呼ばれる低圧インバータは、近年、エレベータ用インバータ、空調用インバータ、産業用インバータなど、用途別専用インバータなどに分化する傾向にある。

空調/水処理用インバータ「FRENIC-HVAC/AQUA」は、大きな市場であるHVAC(Heating Ventilation and Air Conditioning)および水処理市場を対象としている。

また、IP55^(注2)に対応しているため、盤に収納せずに使用することができ、コストを抑制できる。ビルや工場の空調用として使用されるため、電源効率改善用直流リアクトル(DCR)やEMCフィルタを内蔵している。また、従来より大幅にファン・ポンプ制御専用機能を強化しており、インバータだけで圧力や温度制御ができるようになっている。

概略仕様を、表5に示す。

(2) 永久磁石形同期電動機(PMモータ)

永久磁石を使用するPM(Permanent Magnet)モータは、誘導機に比較して高効率、小型・軽量などの長がある。この長を生かすため、表6に示す機種を開発した。

超高効率機種「GNS」「GNP」は、省エネ用で誘導機

表5 「FRENIC-HVAC/AQUA」製品仕様

項目	仕様
電圧	400V
容量範囲	0.75~710kW
保護構造	IP21/55(90kW以下) IP00(110kW以上)
DCR	内蔵(90kW以下)
EMCフィルタ	内蔵
機能	推定末端圧制御、ポンプ制御、温度制御、FireModeなど

表6 PMモータのシリーズ一覧

製品型式	回転センサ	効率	用途
GNS	なし	IE4以上	省エネルギー、 既設誘導機の置換え
GNP		IE4相当	
GNB		IE3相当	省エネルギー、小型・軽量
GNF	あり	IE3相当	一般産業機械制御

<注2> IP55: IEC 60529, JIS C0920で規定されている防塵・防水性能を表すコードであり、“防じん形”と“噴流”に対応するものである。

互換取り付けになっており、一般的な誘導機との効率比較で8.5～3ポイント向上している。高効率機種「GNB」は、省エネ用で小型・軽量になっている。センサ付き機種「GNF」は誘導機よりも1～2注3)倍小さくなっており、小型・軽量を生かして印刷機などの一般産業機械制御に適用できる。

(3) 鉄道車両用パワエレ機器

新幹線プロパルジョンシステム用として主変圧器、主変換装置、主電動機を供給している。主変換装置は世代ごとに改良を重ね、小型・軽量化、ブロワレス化などを行ってきた。また、補助電源装置では高性能・高信頼性を図った特徴的な製品を送り出している。

ドアシステムには、リニアモータ方式とFCPM (Flat Cup Permanent magnet Motor) 方式があり、国内外で採用されている。

(4) 電気自動車用パワエレ機器

地上急速充電器としてCHAdeMO仕様注4)に対応した44kW、39kW、25kW機を開発し、市場投入している。

特に、25kW機は、実績のある情報機器用サーバ電源をベースに開発し、小型化や拡張性を実現している。

(5) 高効率サーバ用電源

コンピュータやサーバ用の直流安定化電源では、高効率、高密度への要求は高い。単に最高効率が評価されるのではなく、低負荷領域も含めた総合的な高効率ガイドラインが示されている。

富士電機では、デバイス適用技術、回路技術に加えデジタル制御技術の応用により、2.1kW、2.5kWにおいて80注5) PLUS Platinum 認証を取得した。

(6) ミニUPS

最近の特に市場が伸びているWebサービスなどを提供する事業者のデータセンターでは、設備導入コスト削減と構築納期短縮を目的に、UPSは自立した電気設備品ではなくサーバラック搭載品を選択する例も増えている。また、ランニングコスト低減のため空調電力を低減し、サーバールームの温度設定が高くなりつつある。一方、付加価値追及のためサーバをラックにより高密度に配置する需要が高まっている。このようなサーバールームに設置されるUPSには、高温下における長寿命化と小型化が強く要求される。

周囲環境温度が高くても使用可能なニッケル水素電池に着目し、サーバラックに収納するニッケル水素電池搭載ミニUPS「LXシリーズ」を開発した。特に、温度条件が厳しいコンテナデータセンターなどへの適用が可能である。

(7) 大容量UPS

社会システムや企業の基盤システムを取り扱っている大規模なデータセンターでは、より高い信頼性と長期的な安

〈注3〉 枠：シリーズ化されたモータは2～3容量を“枠”としてサイズを共通化する場合が多い。

〈注4〉 CHAdeMO：チャデモ協議会の商標または登録商標

〈注5〉 80 PLUS：260ページ「解説1」参照

定性を求めるため、UPSが電気設備の重要な機器として位置づけられている。単機500kVAクラスの大容量UPSを複数台備え、冗長性を持たせるシステム構成が一般的である。このようなデータセンター向けのUPSは効率と小型化が極めて重要視されており、また、特に前述のサーバ用電源と同様に低負荷領域における効率が注目されている。

A-NPC3レベル変換技術を採用した「HXシリーズ」は、高効率と小型化を実現しているだけでなく、3レベル変換の特徴である無負荷損失の低減により、低負荷時の効率が大きく改善されている。

(8) 大容量PCS

メガソーラー向けPCSは、高効率に加え導入コストの低減が求められている。

PCSのインバータ部にはA-NPC3レベル変換技術を採用し、高効率化も実現している。また、PCSや変圧器、スイッチを一体化した屋外型のパッケージ製品を開発した。その結果、設置コストの低減や施工期間の短縮が可能となり、メガソーラーシステム構築のトータルコストダウンを実現できる。

4 あとがき

富士電機のパワーエレクトロニクス機器について、技術動向と製品開発の現状を紹介した。

パワエレ機器は、市場要求を受けて、ベース技術である回路技術・制御システム・パワー半導体における変革を牽引してきた。RB-IGBT、A-NPC3レベル回路技術ならびに専用モジュールや直流配電機器などがこれに相当し、今後はSiCデバイスが続くものと考えている。また、パワエレ機器の応用分野では、それぞれの分野で市場要求に応えるため、さまざまな周辺技術を積極的に取り込んできた。

今後も、パワエレ機器の技術レベルをさらに高めるとともに応用分野を拡大して、社会へ貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 森合浩. 直流高電圧用ブレーカの遮断技術. 富士時報. 2012, vol.85, no.2, p.158-163.
- (2) 大澤千春. 可変速電気駆動システムの機能安全規格 IEC61800-5-2. 日本信頼性学会. 第16回春季信頼性シンポジウム5-4.
- (3) 玉手道雄ほか. パワーエレクトロニクス機器のEMC対応設計技術による信頼性向上. 富士時報. 2011, vol.84, no.2, p.147-151.
- (4) 中沢将剛ほか. Si-IGBT・SiC-SBDハイブリッドモジュール. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.331-335.
- (5) 小松康佑ほか. アドバンストNPC回路用IGBTモジュール. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.362-365.



河野 正志

パワエレ応用製品および交流可変速駆動装置の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター長。



藍原 隆司

汎用インバータ・サーボシステムの開発、企画、エンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部ドライブ事業部駆動企画部主席。電気学会会員。



廣瀬 順

パワーサプライ機器の設計・開発および商品企画に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部パワーサプライ事業部パワーサプライ企画部長。





*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。