

省エネルギー・小型化と生産性向上に貢献する パワーエレクトロニクス

Power Electronics Contributing to Energy Saving,
Compactness, and Increased Productivity

鉄谷 裕司 TETSUTANI, Hiroshi

松本 康 MATSUMOTO, Yasushi

劉 江桁 LIU, Jiangheng

① まえがき

少子高齢化の進行による生産年齢人口の減少により、生産性向上のための生産改革が求められる中、人工知能（AI: Artificial Intelligence）やIoT（Internet of Things）、高速通信技術を活用して、産業プラントやインフラを含むさまざまな分野で自動化が進められている。一方、生産システムの消費電力は急増している。パワーエレクトロニクス（パワエレ）技術とその応用製品は、生産性向上を図るための自動化と、電力を有効活用するための省エネルギー（省エネ）化を両立させる上で、なくてはならない存在である。

富士電機は、コア技術であるパワー半導体とパワエレ技術のシナジーを徹底的に追求し、キーデバイスを活用した信頼性の高いパワエレ機器に、これまで培ってきたエンジニアリング・サービスや最適制御技術、IoTを組み合わせて、産業プラントやインフラにおける生産性向上や省エネに貢献している。図1に、富士電

機のパワエレ機器とその応用分野を示す。本特集では、富士電機が持続可能な社会の実現に向けて、産業プラントやインフラにおいて、省エネ・小型化によって環境負荷を低減したパワエレ機器について述べる。また、生産性向上のため、パワエレ機器の高性能化に限らず、予兆診断などを用いて設備の信頼性向上や保守性向上に貢献する技術およびその応用製品について述べる。

② 省エネルギー・小型化を支える技術と製品開発

パワエレ機器に限らず、あらゆる製品で省エネ・小型化が求められている。特に産業プラントやインフラでは消費電力が大きいため、高効率化や省エネが注目されている。また、鉄道車両や電気自動車などの移動体において、限られた空間に機器を設置しなければならないため、小型・軽量化が注目されている。この章では、富士電機のパワーデバイス、パワエレ機器、な



図1 富士電機のパワーエレクトロニクス機器と応用分野

らびにシステムそれぞれの高効率・省エネ化や小型・軽量化の取組み例について述べる。

2.1 高効率・省エネルギー

(1) パワーデバイス

富士電機は、パワーデバイスの代表的な素子である IGBT^(※1)を製品化し、デバイス構造やプロセス技術の改良などの多くの技術革新により、デバイス単体の高効率・小型化を図り、損失が初期の半分以下となっている⁽¹⁾。しかし、50年以上にわたり主流である Si（シリコン）半導体は理論的性能限界に近づきつつある。そこで、飛躍的な性能改善をもたらすワイドバンドギャップ半導体である SiC（炭化けい素）を用いたパワーデバイスの開発と製品化を進めている。

これまで使っていた Si 製の FWD（Free Wheeling Diode）に代わり、低損失の SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）を、Si 製の高速スイッチング特性を持つ IGBT と組み合わせた高速ハイブリッドモジュールを開発した。また、SiC トレンチゲート MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）チップを開発し、1,200～3,300V 耐圧の All-SiC モジュールを系列化する⁽²⁾。

さらに、これらのパワーデバイスの駆動技術、および周辺回路を最適化し、パワエレ機器の主回路から発生する損失を大幅に低減させ、高効率・省エネ化を行っている。

(2) パワエレ機器

産業プラントやインフラで使用されている大容量パワエレ機器のさらなる大容量化が進む中で、内部主回路の電流やパワエレ機器と制御対象機器との間の送電電流が増加し、電力ケーブルを含めた送電損失も増加している。それらの電力損失を抑制しながら大電力化するために、パワエレ機器は高電圧化している。

例えば、電磁誘導作用を利用して金属を加熱・溶解する高周波誘導炉では、誘導コイルに印加する電圧を従来の 2 倍の 6kV へと高電圧化している。そのために、絶縁構造と絶縁材料を見直し、高温・多湿・多塵埃（じんあい）の環境下でも部分放電の発生を抑制している。

ソーラーパネルで発電された直流電力を送電システムに連系するために交流に変換するパワーコンディショナ（PCS：Power Conditioning System）において、ソーラーパネルからの入力電圧を従来の DC1,000V から DC1,500V に高電圧化することで、直流ケーブ

ルの電流を低減して送電ロスを抑制する。

パワエレ機器では、パワーデバイス単体の電流の制約があるため、パワーデバイスを並列化したり、パワーユニットまたはパワエレ機器を並列化したりして、大容量化に対応している。しかし、常時 100% 負荷で設備が稼働しているとは限らない。負荷が低い時には、並列で使用するパワーユニットの数を減らすことで、無負荷損失を低減する台数制御技術を開発し、製品に適用して、低負荷時における高効率と省エネを実現している。

また、パワエレ機器の高効率化だけではなく、産業プラントやインフラの動力源として使用されている回転機の高効率化も行っている。PM モータ^(※2)（永久磁石形同期電動機）が持つ小型・高効率という優れた特長を生かした上で、さらに、高グレードで板厚の薄い電磁鋼板を鉄心に採用することで、回転機の鉄損を低減し、銅損と鉄損の比率を考慮して損失が最も小さくなるように部品形状を最適化し、高効率化した流体機器用 PM モータを開発した（24 ページ“流体機器用 PM モータの小型・高速・高効率化”参照）。

(3) パワエレ機器システム

産業プラントやインフラにおいて、数多くのパワエレ機器が協調制御しながら運転している。高速運転している機械系を短時間で減速や停止などの制動を行うためには、機械の運動エネルギーを素早く消費する必要がある。一般的な汎用インバータは、ダイオード整流方式で交流電力から直流中間電圧を生成している。そのため、機械系の運動エネルギーが電気エネルギーに変換されたとしても、インバータの直流中間回路から電力系統側に回生できないので、回生抵抗を使って消費するしかなかった。そこで富士電機は、産業プラントやインフラのシステム全体の省エネを進めるため、電源回生機能付の PWM コンバータ「RHC-C シリーズ」を提供している。さらに、機能や操作性を向上した「FRENIC-RHC シリーズ」を新たに開発した（図 2）。これにより、制動エネルギーを電源側に回生すると同時に、電源側の電流を正弦波にすることにより、高調波抑制対策ガイドラインに適合している。

2.2 小型・軽量化

(1) パワーデバイス

前述のように、富士電機は SiC-SBD と高速スイッチングが可能な IGBT を組み合わせた高速ハイブリッドモジュールや、SiC トレンチゲート MOSFET チッ

(※1) IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistor の略である。ゲート部は MOSFET と同じ構造で、酸化絶縁膜で絶縁されたゲート部を持つ電圧制御型デバイスである。MOSFET とバイポーラトランジスタの長所を生かし

たものである。バイポーラ動作であるため伝導度変調を用いることができるので、インバータへの応用に十分なスイッチング速度と高耐圧・低オン抵抗を両立できる。

(※2) PM モータ

永久磁石形同期電動機（Permanent Magnet Synchronous Motor）のことである。回転子に永久磁石を使用しているため、誘導電動機などに比べると、高効率で小型・軽量化が可能という特徴がある。



図2 「FRENIC-RHC シリーズ」

ブを開発し製品化した。この新しいパワーデバイスは損失が低いので、主回路から発生する損失を大幅に低減して効率が向上するだけではなく、パワーデバイスの冷却に必要な冷却機器を大幅に小さくすることができ、結果的に装置全体の小型・軽量化につながる。また、高速スイッチングが可能なこれらのパワーデバイスを使うと、高周波で動作できるようになるため、周辺回路のフィルタやリアクトルなどを小さくすることができ、装置の小型化につながる。例えば、N700S 新幹線の主変換装置では、SiC パワー半導体モジュールを採用し、冷却体を小型・軽量化した。さらに、パワーユニット内の構造および導体構成の最適化を行い、従来比9%の小型化と14%の軽量化を実現した。

(2) パワエレ機器

小型・低損失化するため、新しいパワーデバイスを採用する上で、パワエレ機器の構造設計や熱冷却設計技術が重要である。

大容量のパワエレ機器を屋外に設置する場合、精密機器であるインバータユニットおよび制御機器部の保護等級を守りながら、大容量の主回路から発生する熱を冷却する必要がある。

屋外に設置する2.5MWクラスの太陽光発電向けPCSでは、盤内を気密エリアと外気エリアの二つに分けて、精密機器などを気密エリアに配置し、IGBTなどの高発熱部品ではヒートシンクだけ外気エリアに設けて外気を使って冷却している(図3)。これらの工夫により、装置体積を縮小し、業界最小クラスの設置面積を実現している(15ページ“メガソーラー向けDC1,500V用PCS「PVI1500CJ-3/2500」”参照)。

また、N700S新幹線向けの主変圧器は、銅損を低減する設計とし、巻線にアルミニウム電線を、また、冷却方式としてユニットクーラを採用することにより、12%の小型化と10%の軽量化を実現した(19ページ“世界の安全・安心・快適な公共交通に貢献する鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器”参照)。

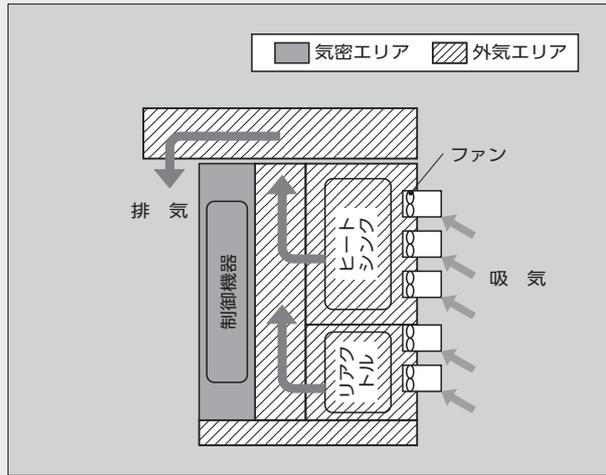


図3 メガソーラー向けPCSの冷却構造

(3) パワエレ機器システム

複数台のパワエレ機器を並列することにより、さらなる大容量のニーズに対応している。並列した機器間に発生する横流や電流アンバランスを緩和するため、出力トランスまたはリアクトルを介して並列するのが一般的である。しかし、出力トランスやリアクトルなどは大型の重量物である。富士電機は、高周波誘導炉では、複数台の主回路スタックの並列接続によって生じる電流アンバランスを、最短距離で接続することにより十分に小さく抑え込んで、電流バランス用リアクトルなどを不要にした。これにより、盤の幅寸法を従来の同一電源容量の盤と比べて約25%の小型化を実現している(10ページ“高効率高周波誘導炉「F-MELT100Gシリーズ」”参照)。

また、PWMコンバータFRENIC-RHCシリーズでは、多重接続するそれぞれのユニットに、高速シリアル通信の光ファイバで接続することで(図4)、各コ

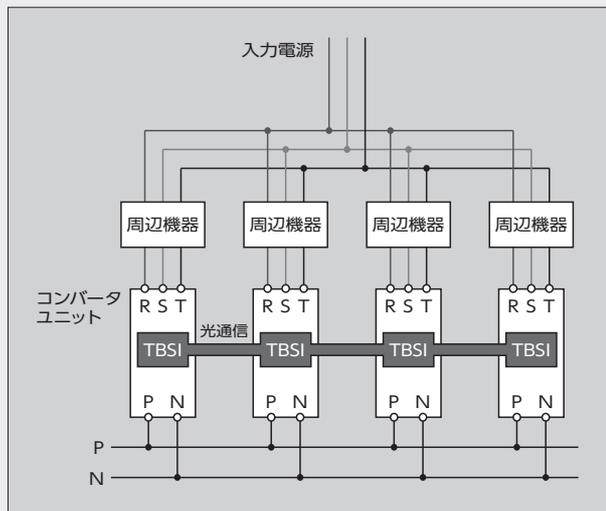


図4 「FRENIC-RHC シリーズ」のトランスレス並列システムの構成

ンバータの入力側の電流の位相が同一になるよう制御し、トランスなしで最大4台の並列が可能である(37ページ「電源回生機能付き高効率PWMコンバータ「FRENIC-RHCシリーズ」」参照)。

③ 生産性向上を支える技術と製品開発

生産性向上とは、組織が保有する経営資源を最大限に有効活用し、最小限の投資で最大限の成果を生み出すことである。この章では、パワエレ技術と制御技術を駆使して実現した、生産設備や産業プラント、ならびにインフラにおける生産性向上の取組みについて述べる。

3.1 高性能化による生産効率向上

生産設備や産業プラントの生産効率を向上させる上で、設備を高速に動作させることはもちろんのこと、設備の動作応答性も重要である。富士電機は、生産設備や産業プラントで使われる汎用インバータやサーボシステムの制御技術をさらに進化させ、応答性を大幅に向上させた。

「FRENIC-MEGA (G2) シリーズ」では、従来より高速なMCU (Micro Controller Unit) を採用して、これまで培った独自のモータ制御技術をさらに進化させ、従来に対して2倍の電流応答100 Hz以上、速度応答200 Hz以上を実現した。高い応答性により、外乱による機械への影響が低減でき、安定した高速動作が実現する。サーボシステム「ALPHA7シリーズ」では、従来のサーボシステムで培ってきた制御アルゴリズムをさらに進化させることにより、周波数応答を従来の1,500 Hzから3,200 Hzに向上させるとともに、位置決め調整時間を1 ms以下で実現した。短いタクトタイムと高精度が要求される装置の機械性能を向上させることができる。

一方、モータの軸出力は機械系につながっている。例えば、ロボットアームなどのバネ性を持つ構造においては、モータの急加減速時にワーク先端に振動が発生することがある。単に高速化や高応答性を実現してもワーク先端の振動が減衰するまでの待ち時間が長ければ、生産効率の向上にはつながらない。そこで、ALPHA7シリーズでは、ワーク先端の振動を抑制する制振制御の方式を見直し(図5)、従来の制振制御に比べ、振動を約50%低減し、設備の生産効率向上に貢献できるようにした。

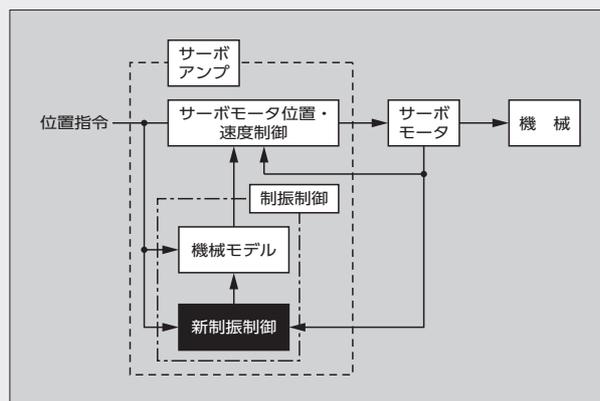


図5 「ALPHA7シリーズ」の新制振制御ブロック図

このように、機能と性能を進化させたパワエレ機器を開発することで、生産設備や産業プラントの生産効率と生産性の向上に貢献している。

3.2 診断技術や冗長化による信頼性向上

生産設備や産業プラントの信頼性を向上させるため、富士電機は、顧客が信頼性の高いシステムを構築するために必要となる耐環境性に優れ、機能安全規格に対応したパワエレ機器を提供している。FRENIC-MEGA (G2) シリーズでは、プリント基板に全面コーティングを施して、JIS 60721-3-3 / IEC 60721-3-3 が定める Class 3C2 に対する耐環境性能を持っている。また、ALPHA7シリーズでは、機能安全規格 IEC 61800-5-2 / IEC 61508 (SIL3)、ISO 13849-1 (PL-e) で定める STO (Safe Torque Off) 機能を標準搭載している。ALPHA7シリーズのモータと安全オプション (WSU-ST1) を組み合わせることで、SS1 (Safe Stop 1) などの安全機能に対応している。

これらの対策を行ったパワエレ機器を導入するだけでなく、設備全体の異常の前兆や異常を早期に検知し、体系的に予防保全することは大切である。

FRENIC-MEGA (G2) シリーズでは、インバータの重要な構成要素である IGBT モジュールの寿命をインバータの運転状況(負荷や温度などの累積)を基に推定し、寿命到達前にメンテナンスが必要であることを知らせる。または、冷却フィンが目詰まりなどで生じるインバータの冷却性能の低下を温度センサが測定したインバータ内の温度を基に推定し、清掃や点検が必要であることを知らせる。このようなパワエレ機器自体の異常の前兆をさまざまな通信プロトコルに対

(*3) Class 3C2

JIS C60721-3-3 (IEC 60721-3-3) で定める環境条件である。地域全体に工業活動が分散している、または交通量の多い都市地域で生じる汚染が通常レベルの場所をいう。

(*4) STO

IEC で定義された、直ちにモータを停止する安全機能をいう。

(*5) SS1

IEC で定義された、モータを減速停止させたのち、STO 動作する安全機能をいう。

応した通信機能を用いて上位制御システムに通知し、ユーザーにメンテナンスなどの処置を促すことにより、システムの突然の停止を未然に防ぐ機能を取り込んだ高信頼性システムが構築できる。

パワエレ機器自体の予兆を診断するだけでなく、ALPHA7シリーズでは、指令トルクから加減速トルクや摩擦・重力トルクなどを含まない負荷トルクを抽出するいわゆる負荷トルクモニタ機能を搭載した。この機能を活用することで、機械装置の衝突などの異常を検知し、機械への衝突時の衝撃を緩和させ、被害が大きくなることを防止する(図6)。さらに、この機能は、異常トルクにより加工不良の判断に役立ち、不良品の流出を防止でき、品質向上にも貢献できる(51ページ“サーボシステム「ALPHA7シリーズ」の新機能と適用例”参照)。

また、産業プラントやインフラでは、ドライブ装置以外にもさまざまな情報機器からなるシステムにDC電源を供給する必要がある。これらのシステムを安定稼働させるために、富士電機は、冗長機能を内蔵し、装置との接続をコネクタを使って簡単にできるようにした制御盤用電源を開発した。必要に応じて、電源が内蔵する冗長機能、あるいは製品の外部に設けた冗長ユニットを使って、信頼性の高い直流電源を提供できる(28ページ“制御盤用AC-DC電源”参照)。

これらの予兆診断機能や冗長機能に対応した製品を採用したシステムは高い信頼性を持ち、設備の稼働率を上げ、生産性が向上する。

3.3 メンテナンス性向上による保守容易化

前述の診断機能や冗長化による予防保全を実施することで、システム全体の信頼性は大幅に向上するが、使用条件や使用環境による偶発的な故障を完全に防ぐことは困難である。富士電機は、偶発的な故障や使用環境による故障に起因する設備ダウンタイムの短縮に

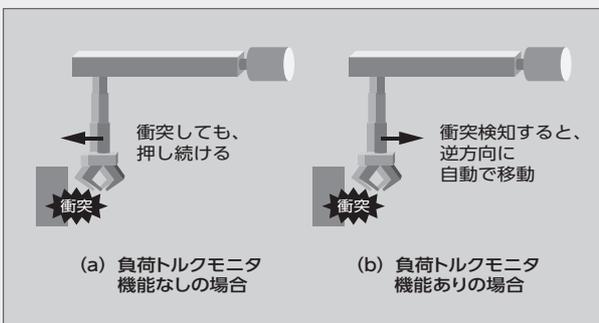


図6 「ALPHA7シリーズ」の負荷トルクモニタ機能による干涉検知

取り組んでいる。

(1) トレースバック機能

万が一パワエレ機器が故障した場合に、故障の箇所と原因を素早く特定するためのツールなどを提供している。例えば、「FRENIC-MEGA (G2) シリーズ」や「FRENIC-RHC シリーズ」などの多くのパワエレ機器には、トレースバック機能を搭載している。トレースバック機能は、パワエレ機器にアラームが発生する直前・直後の内部や外部状態を時系列データとして取得し、記録する。記録された時系列データをPC用支援ツール「FRENIC-Loader 4」を用いて読み出し、アラームが発生した直前・直後の波形を確認できる(図7)。これにより、故障の発生箇所を特定しやすくなり、メンテナンスに必要な時間や設備のダウンタイムを短縮できる。さらに、発生原因を特定しやすくなるため、再発防止対策にも有効活用できる(32ページ“高性能・多機能形インバータ「FRENIC-MEGA (G2) シリーズ」”参照)。

(2) 大容量パワエレ機器の主回路のユニット化

大容量のパワエレ機器においては、重要な有寿命部品である主回路部分を簡単に交換できるようにユニット化している。前述の寿命診断機能で交換が必要と診断された場合、あるいは偶発的な要因で故障した場合には、ユニットごとに交換して、ユーザ設備を素早く復帰できる。さらに、重いユニットの下部にキャスタを配置することで容易に引き出すことができ、交換しやすとした。

(3) レトロフィット^(*)

産業プラントやインフラにおいては、大型の盤構造のパワエレ製品を採用した設備の更新で、基礎工事が

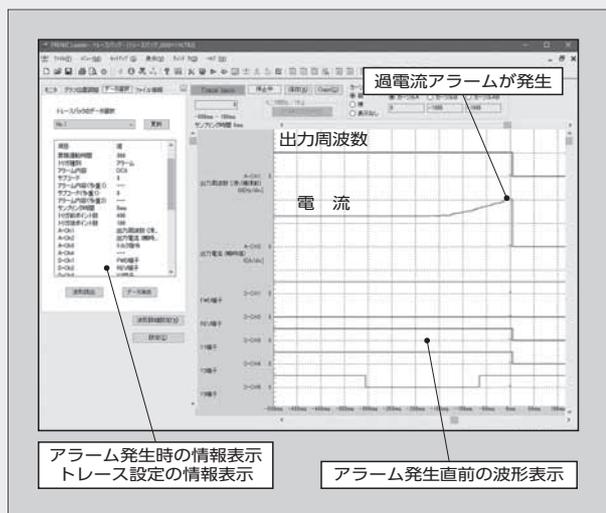


図7 「FRENIC-MEGA (G2)」のトレースバック機能

(*) レトロフィット

1960年代米国で生まれた言葉で、汎用工作機械を改

造して、NC機に変換させることに使用した。今では広い意味で、古い製品に新しい製品をうまくマッ

グさせて機能向上させることや、旧型式の製品を改装、改造して新型式にすることをいう。

らの更新作業となると顧客設備の停止期間も長くなってしまふ。また、設置場所によっては部材の搬入口が狭く、盤が搬入できない場合もある。これらの問題を解決するため、富士電機は盤全体の更新ではなく、インバータセルと制御スタックおよび一部電気品などの有寿命品だけを更新するレトロフィット製品（図8）を開発し、設備の更新時間を短縮できるようにした（42ページ“高圧インバータ「FRENIC4600シリーズ」用レトロフィット製品”参照）。

このように、パワエレ機器の故障の発生個所と発生原因を容易に特定させ、故障しやすい主回路部分を交換しやすい構造にすることにより、偶発的な故障による顧客設備のダウンタイムを短縮することで、産業プラントやインフラの生産性を向上させることができる。

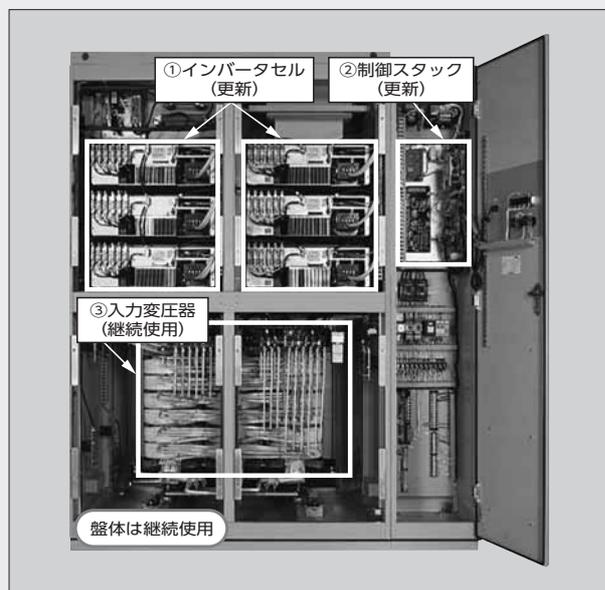


図8 高圧インバータレトロフィットのイメージ

4 あとがき

富士電機が取り組んでいる省エネルギー・小型化と生産性向上に貢献するパワーエレクトロニクスの概要について述べた。

富士電機は、高効率でかつ小型化したパワーエレクトロニクス機器をさらに開発していく。また、予兆診断技術やIoT、AIを活用して、産業プラントやインフラの分野において省エネルギーや生産性向上を進めて、持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 友高正嗣. パワーエレクトロニクス機器の現状と展望. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.1, p.7-12.
- (2) 電子デバイス. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.2, p.116-119.



鉄谷 裕司

富士電機株式会社執行役員、パワエレシステムインダストリー事業本部長。



松本 康

パワエレシステムの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステムインダストリー事業本部開発統括部長兼パワエレシステムエネルギー事業本部開発統括部長。博士（工学）。IEEE 会員、電気学会フェロー。



劉 江桁

パワエレシステムの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレシステムインダストリー事業本部開発統括部パワエレ機器開発企画部長。博士（工学）。電気学会会員。



*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。