

成果と展望

強いコンポーネントをコアにしたエネルギーソリューションの提供



江口 直也

富士電機株式会社 取締役執行役員
技術開発本部長

1. まえがき

富士電機は、電気、熱エネルギー技術の革新の追求により、エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献するという思いを込めて“*Innovating Energy Technology*”というブランドステートメントを策定しています。この思いを実現するため、富士電機では、電気エネルギーを安全・安心かつ効率的に供給・利用する技術や、熱エネルギーを無駄なく活用する技術、ならびにそれらを最適に制御する技術の開発に研究資源を集中しています。2013年に策定した中期経営計画の中では、パワー半導体とパワーエレクトロニクス（パワエレ）技術をコアにし、計測・熱コンポーネントも含めて徹底的に差別化されたコンポーネントを開発し、それらを核にして、制御技術をプラットフォーム化・パッケージ化し、エネルギーソリューションを提供する研究方針を掲げています（図1）。本稿では、この方針に基づく最近の開発状況を紹介いたします。

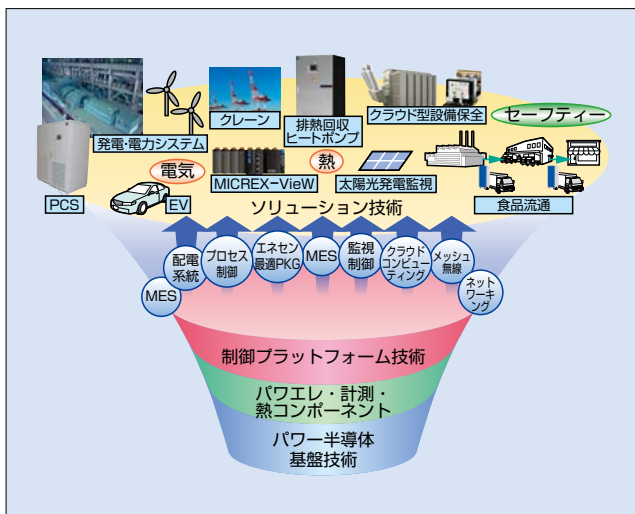


図1 富士電機のコア技術と注力分野

2. 世界トップレベルを狙う SiC デバイスとその適用製品

パワー半導体とパワエレ技術のシナジーにより、徹底的な差別化を狙うコンポーネントの開発としては、Si デバイスの物性限界を超えて劇的に損失を低減する次世代デバイスである SiC（炭化けい素）パワー半導体と、これを適用したパワエレコンポーネントの開発に集中しています。

パワー半導体の生産拠点である松本工場の SiC 生産設備において、業界に先駆けて SiC の 6 インチウェーハプロセスラインを稼動させました。このラインでは、国立研究開発法人 産業技術総合研究所と共同で開発した 600～1,700 V 耐圧の SBD（Schottky Barrier Diode）と 1,200 V 耐圧の MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）を量産しています。同時に SiC デバイスが持つ性能を最大限に発揮できるように高温動作、高放熱、低インダクタンスの超小型・高信頼性の各種モジュールを開発しています。

1,200 V 耐圧の SiC-SBD を FWD（Free Wheeling Diode）に使用し、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）チップには富士電機製の第 6 世代「V シリーズ」を適用したハイブリッドモジュールを製品化しました。このハイブリッドモジュールをインバータに適用した場合、従来の Si デバイスを使用した場合と比較して、発生損失を最大約 30% 低減することが可能で、特に高周波動作において低減効果が大きくなります⁽¹⁾。さらに、1,700 V 耐圧の SiC-SBD を FWD に使用したハイブリッドモジュールも製品化し（図 2）、690 V 系列のインバータ「FRENIC-VG スタックシリーズ」に搭載して 2014 年 11 月に発売しました（図 3）。このハイブリッドモジュールにより発生損失を約 30% 低減できました。このモジュールは高速でスイッチングするため、並列に接続したデバイスの電流分担の適切化や EMC（Electromagnetic Compatibility：電気・磁気的な妨害を及ぼさないこと / 及ぼされないこと）の低ノイズ化が必要であり、電磁解析シミュレーションを駆使してインピーダンスのマッチング設計を実施しています⁽²⁾。

さらに、SiC-SBD と SiC-MOSFET を用いた All-SiC



図2 SiC ハイブリッドモジュール

効率は、98.8%と高い効率を実現しています。また、直流昇圧回路とインバータ回路を最適に組み合わせることにより、フットプリントサイズを60%に小型化しています。本製品は、2015年度日本電機工業会電機工業技術功績者表彰で最優秀賞を受賞いたしました。

さらに、SiCの利点が発揮できる3,300Vなどの高耐圧のSBDとMOSFETのデバイス・モジュール開発を進め、試作品の評価とそれらを適用したパワエレ製品の開発を加速しています。

これまで述べたように、最先端のSiCデバイスとその性能を最大限に引き出すモジュール技術を組み合わせ、さらにはそれらを搭載した小型で低損失な差別化されたパワエレ製品の開発により、SiCデバイスとその適用製品で世界トップレベルを狙っていきます。

3. 差別化されたパワエレ製品

パワー半導体技術とパワエレ技術は富士電機のコア技術であり、SiC以外でも、これら二つの技術のシナジーを生かして省エネルギー（省エネ）につながる特徴あるコンポーネントを開発しています。

1台のモータで発電と駆動を行うマイルドハイブリッド車向けのインバータに搭載される、RC (Reverse-Conducting)-IGBTを適用したモジュールを開発しています。RC-IGBTは、IGBTとFWDを1チップ化したデバイスです。富士電機で量産しているフィールドストップ型IGBTをベースに最先端の薄ウェーハ加工技術により、低損失化した650V耐圧のRC-IGBTを開発しました。これにより、通常のIGBTとFWDの組み合わせと比較して、20%の小型化が実現できます。

全世界の使用エネルギーの約40%を占めるモータの高効率化のため、日本でもトップランナー制度によって効率規制が2015年4月から開始されました。その規制基準に対応した「プレミアム効率モータ」を開発しました。有限要素法や電磁界解析を駆使して、スロット形状の最適化による銅損や鉄損の低減、熱流体回路網法を活用した熱設計による風損の低減などにより効率規制値を満足させました(図5)。

また、空調機器のファン駆動用としてモータにインバータ機能を内蔵したインバータ一体型モータを開発しました(図6)。ファンの冷却風による冷却構造とし、熱設計と耐振動解析を実施し、汎用インバータと標準モータの組み合わせと比較して、体積は38%減、質量は31%軽量化を実現しました。ダンパ制御の場合と比較しても、40%以上の省エネ効果が得られます(6)。

グローバル市場向けインバータ製品としては、中国ファン・ポンプ市場向けの「FRENIC-VPシリーズ」や空調向け「FRENIC-HVAC」の北米の575V電源に対応した機種の開発、欧州市場向けエレベータ用インバータ「FRENIC-Lift」のモデルチェンジなど、品ぞろえを進め

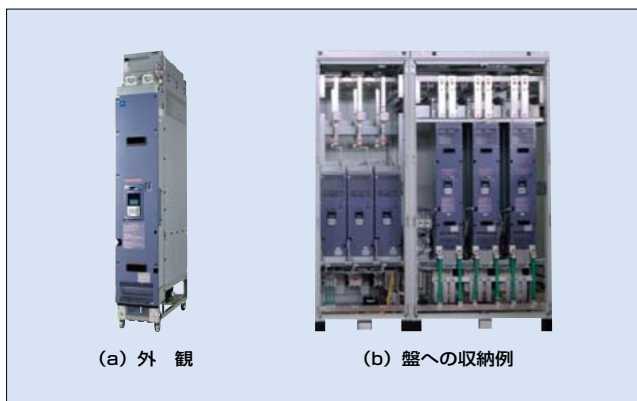


図3 690V 系列インバータ「FRENIC-VG スタックシリーズ」

モジュールを開発し、メガソーラー用パワーコンディショナ(PCS: Power Conditioning Sub-system)に適用しました(図4)。このモジュールは、SiCデバイスの高密度実装のため、ワイヤボンディングに代わりパワー基板上に形成した銅ピンにより配線しています。さらに、低熱抵抗化のために厚銅板が接合された窒化けい素基板を採用し、エポキシ樹脂封止などの技術を適用することで、高温動作、高放熱、低インダクタンスを実現した超小型・高信頼性モジュールです。

このモジュールを搭載したメガソーラー用PCSの最大



図4 メガソーラー用パワーコンディショナと All-SiC モジュール

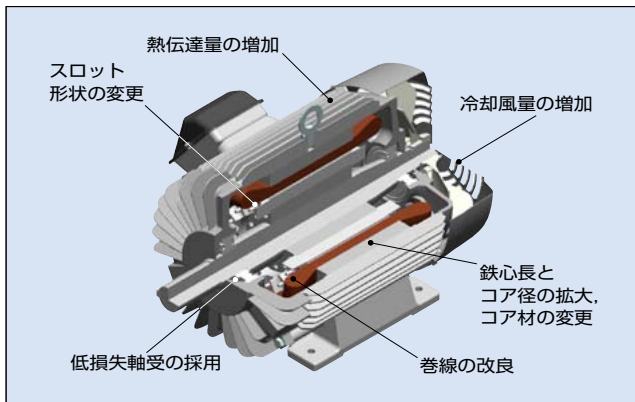


図5 モータの損失低減策

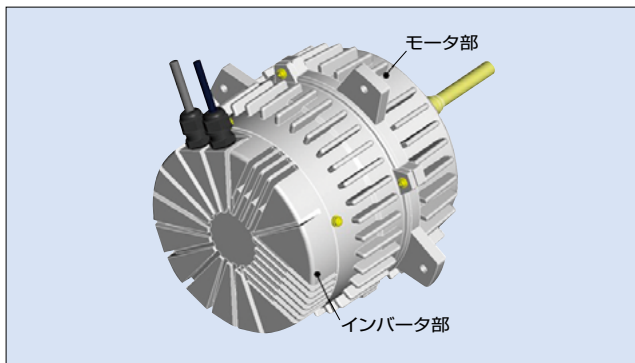


図6 インバーター体型モータ（開発機）

ています。

受配電・開閉・制御機器コンポーネントにおいては、省スペースかつ高信頼性という設備や制御システムのニーズに応える制御機器を開発しています。小型電磁接触器「SKシリーズ」の32A品（SK32形）では、横幅寸法53mmの小型化を実現し、取付け面積を33%削減しました。永久磁石を用いた有極電磁石を新たに開発し、電磁石容量を大幅に低減しています（図7）。図に示すプランジャ動作時の電圧降下による不安定動作をなくすため、コイルへの電圧印加後、コイル電流が十分に上昇してからプランジャが動作するように、永久磁石の磁束量を最適化しました。こ

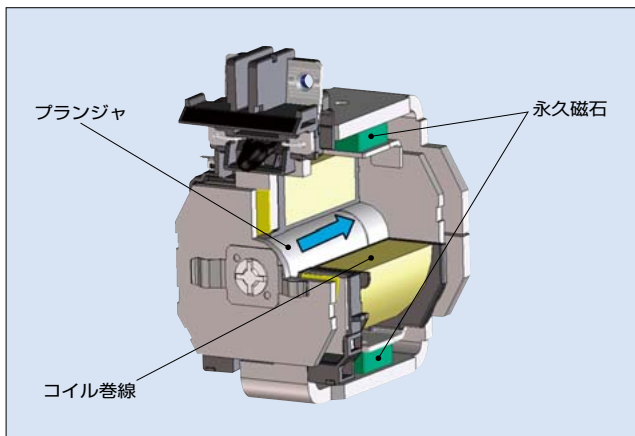


図7 直流電磁石

れにより、投入動作直前の永久磁石とプランジャ間の保持力を大きくして動作を安定させ、小さな電磁石で必要十分な吸引力の確保を実現しました。

また、充電部を露出させないことで、安全性を高めたサーキットプロテクタを開発しました。制御回路を保護するための端子カバーの機能を製品に一体化して製品外形を従来より20%小型化し、かつ、ねじアップ端子構造の標準採用により配線工数を大幅に削減しています。

4. 計測・熱コンポーネント

富士電機が得意とするMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術でセンサを小型化し、消費電力を千分の1以下とすることで電池駆動を可能とした、世界初の電池で駆動する家庭用ガス警報器を開発しました。大阪ガス株式会社からは2015年5月に発売され、東京ガス株式会社からは10月に発売されます。大阪ガス株式会社との共同研究により、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）助成事業“次世代高信頼性ガスセンサー技術開発”の支援の下、長期信頼性を確立しました。

差別化された熱コンポーネントとして、データセンターの空調エネルギーの省エネを狙った、外気の冷熱と蒸気圧縮式の冷凍冷房を組み合わせたハイブリッド空調機「F-COOL NEO」を開発しました（図8）。外気の冷熱活用に当たっては、外気に含まれる塵埃（じんあい）や腐食性物質などの影響を受けにくい間接方式を採用し、外気温度と冷房負荷に応じてそれぞれの運転割合を自動で制御する方式を開発しました。モジュール型の模擬データセンターでの実測データを基に推定した年間の消費電力量は、一般の空調機の約1/3であり、大幅な省エネが実現できます。なお、本製品は、2014年度日本機械工業連合会会長賞を受賞しました。



図8 ハイブリッド空調機「F-COOL NEO」評価装置

5. 制御システムプラットフォーム

エネルギーの安定供給，省エネ，安全・安心，自動化・効率化に貢献する各種制御ソリューションパッケージを開発しています。そのコア要素として制御システム層，ソフトウェアライブラリ層，エンジニアリング環境から構成される制御システムプラットフォームを開発しました。

工場における製品の品質向上と操業の安定化・高効率化ソリューションとして，高速コントローラ・大容量ネットワークによる駆動システムソリューションを開発しました。図9に示すように，従来は統合コントローラと専用モーションコントローラの2台のコントローラで構成していた機械制御システムを，高速・高精度コントローラ「SPH3000MM」により1台で構成することが可能となります。SPH3000MMは，従来の「SXバス」と比較して，4倍の伝送速度と100倍超のタクト精度を実現する高速フィールドバスである「E-SXバス」を2系統搭載しています。

また，高速・大容量制御ネットワークである「SX-Net」とE-SXバスを実装した高速・大容量ネットワーク対応コントローラ「SPH3000MG」により，複数のコントローラの同期が可能となります。さらに，複数コントローラや操作・監視装置を制御ネットワークで接続して構成されるプラント制御システムの高精度化が実現できます。鉄鋼プロセスライン制御システムの各セクションを統括するコントローラとインバータを制御するコントローラ（DMC：Drive Master Controller）として，SPH3000MGを適用した例を図10に示します。1台のDMCで最大で64台のインバータを制御することができ，コントローラの台数を大幅に削減することが可能となります。

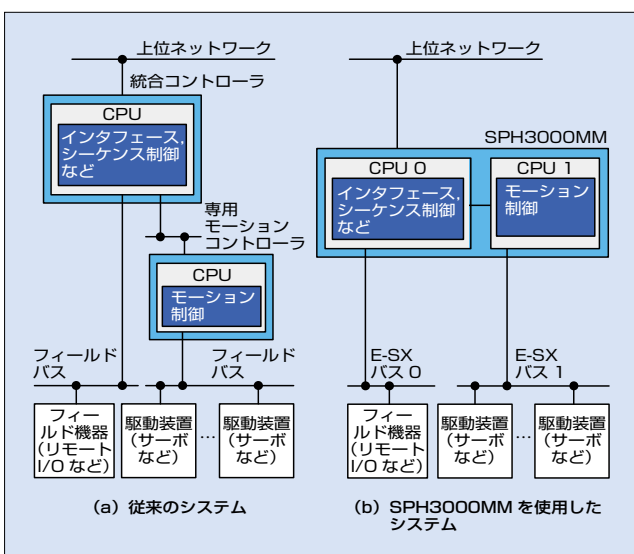


図9 従来システムと「SPH3000MM」システム

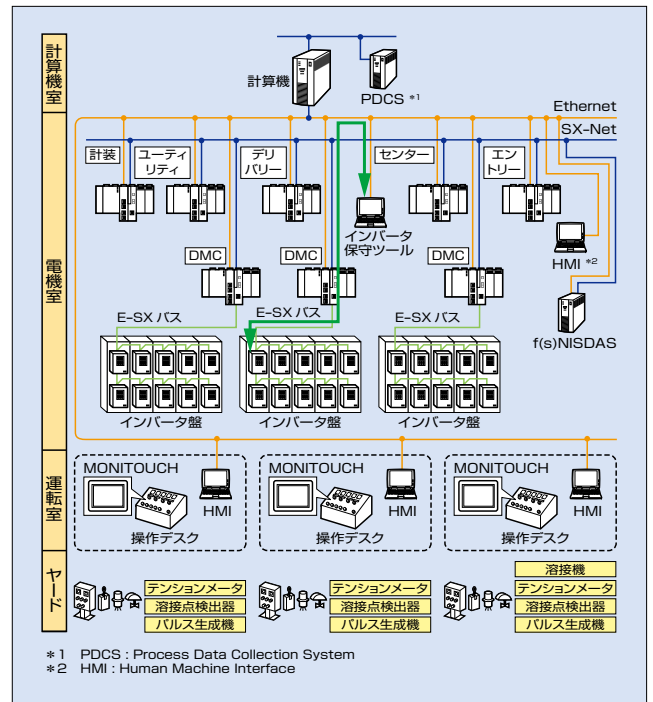


図10 新しい鉄鋼プロセスライン制御システムの構成例

6. エネルギーソリューション

エネルギーソリューションとして，火力発電や地熱発電の高効率化を継続的に推進しています。さらに，電気エネルギーや熱エネルギーの最適制御により省エネを実現する各種エネルギーマネジメントシステム（EMS：Energy Management System）を開発し，スマートコミュニティの構築を目指しています。

2010年度から開始された経済産業省“次世代エネルギー・社会システム実証事業”では，四つの地域（横浜市，豊田市，けいはんな学研都市，北九州市）で，次世代エネルギーシステムの実現を視野に，地域の再生可能エネルギーの安定で高効率な活用やBEMS（Building Energy Management System），HEMS（Home Energy Management System），FEMS（Factory Energy Management System），REMS（Retail Energy Management System）などのエネルギーマネジメントシステムの開発・実証が行われました。富士電機は，北九州市，けいはんな学研都市の実証システムに積極的に参加し，2014年度でそれぞれ実証を終了しました。

北九州市では，“地域節電所”を核とした地域エネルギーマネジメントシステム（CEMS：Cluster Energy Management System）を開発し，各種実証を実施しました。CEMSからの節電要請に対して，一般家庭自身で参加・不参加を決めて，参加に応じてプリペイドカードに交換できるエコポイント付与による需要調整の実証をしました。また，太陽光発電の発電量が多く余剰電力が発生する軽負荷日において需要を喚起する“秋季CBP（クリティ

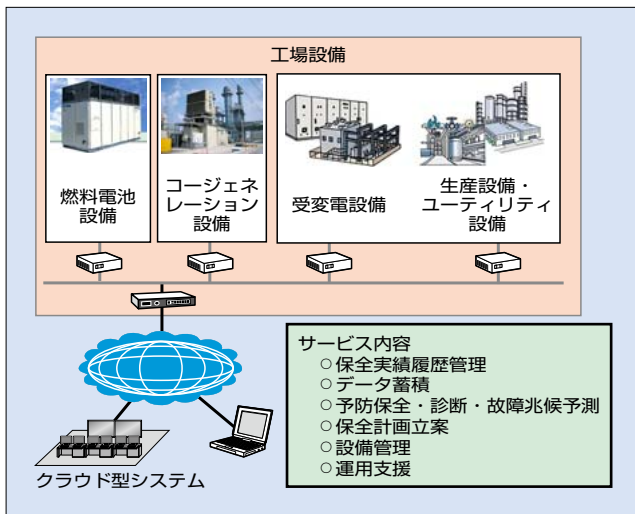


図11 統合クラウドサービス

カル・ボトム・プライシング)”を行いました。

けいはんな学研都市の実証事業では、BEMSやREMSを対象に商用施設やホテルなどにおいて、イベントの有無や入場者数の推測値からエネルギー需要を予測する入場者対応予測アルゴリズムの要素技術開発と実証を行いました。

また、店舗ショーケースで培ってきた気流制御によるエアーカーテン技術と計測制御を活用して、冷凍冷蔵倉庫において、さらなる省エネ制御ソリューションの開発を進めています。

最近、全てのものがインターネットにつながるIoT (Internet of Things) という概念が脚光を浴びています。富士電機は、現場のデータをクラウドに上げ、クラウド上での解析や最適化などによる各種サービスやソリューションの提供を考えています。その一つとして、「統合クラウドサービス」を開発しました。富士電機の強みであるセンシング技術を基に収集したデータをクラウド上で省エネ分析を行う技術をはじめ、需要予測技術や品質傾向解析技術、設備劣化診断技術などを駆使し、エネルギー管理・省エネ制御支援、設備稼働監視、保全業務支援などの機能を一体化して、設備導入から運用・更新までのトータルライフサイクルを通じて全体最適を支援するサービスです(図11)。

今後も、特徴あるセンシング技術と現場ノウハウを生かした各種の分析・解析技術や最適化技術を進化させ、IoTを活用したサービス、ソリューションを創出します。

7. 基盤・先端技術

これまで述べてきた各技術を共通的に支える基盤技術や、将来を見据えた先端的な研究開発を進めています。

IoTによるサービスやソリューションの差別化のためには、収集したデータの解析技術の差別化が重要となります。製造プロセスの異常診断のために多変量統計的プロセス管理による異常診断技術を開発しました。その技術をタービンシャフトの振動データ解析に適用した例を図12、図13

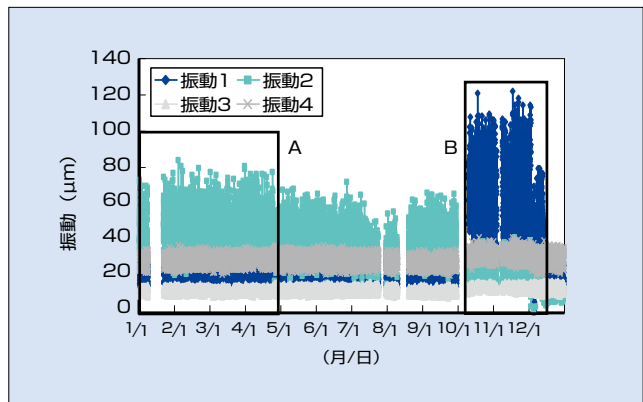


図12 タービンシャフトの振動データ

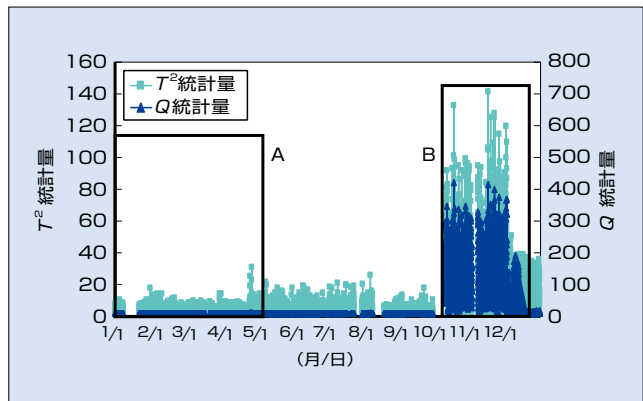


図13 振動データの解析結果

に示します。図12は、振動データで、図中のB区間はセンサに異常があり、判断のしきい値である120μm以下ですが、異常かどうかの判断ができません。一方、正常区間(図中のA)で変量統計的プロセス管理モデルを構築して統計量を評価した図13では、B区分の統計量が他の部分と比較して大幅に大きくなっており、その区間が異常であることを明確にすることができました。その他、部分的最小二乗法や数式による最適化手法の開発と、実データへの適用検証も実施しています。

また、熱流体や構造、電磁気、EMCなど、各種シミュレーション技術を構築しています。それらに加えて、受配電・開閉・制御機器コンポーネントなどの接点の開閉時に発生するアーク挙動のシミュレーション技術を開発しました。熱流体解析と電磁界解析を連成させることにより、外部磁場やアークそのものの電磁力を考慮するとともに、アークによって発生する蒸発ガスもモデルに組み込んでいます。

サーキットプロテクタのアークシミュレーションの例を図14、図15に示します。図14からアーク電圧の計算結果が実測とよく一致していることが分かります。また、本シミュレーションにより、時系列で温度分布、電流密度、ガス流速、圧力、ガス成分などを計算することができ、消弧室の設計検討に活用することができます。

このほか、熱力学的なシミュレーションによるタービン

材料の腐食予測など最先端のシミュレーション技術の研究も継続して実施しています。

材料技術としては、SiC などの高温動作デバイスのパッケージ用として 250℃ に耐えられる樹脂の開発をはじめ、金属組織シミュレーションを活用した異種金属接合技術の開発、磁性材料の残留応力や熱による物性変化などについて、継続して研究を推進しています。

また、グローバルに製品を展開していくに当たって、国際規格への対応はますます重要となっており、富士電機もこの国際規格への取組みを継続して強化しています。特に、パワエレやスマートコミュニティ関連では、国際

委員会活動に積極的に取り組んでおり、PCS の EMC やインバータ効率測定の規格制定活動に貢献し、成果を上げています。

8. あとがき

富士電機が取り組んでいる、電気エネルギーを安全・安心に効率的に供給して利用する技術や、無駄なく熱エネルギーを活用する技術、ならびにそれらを最適に制御する技術を中心にその概要を紹介しました。

2014 年度は、研究開発力の強化に向けて、全社の研究開発棟として東京工場に、パワー半導体の技術開発センターとして松本工場に、器具事業の評価試験機集約を行う研究開発棟として吹上工場に、それぞれ建設を開始しました。

このように今後も研究開発を精力的に進め、富士電機のブランドステートメントに込められた“電気、熱エネルギー技術の革新の追求により、エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献する”という思いを実現し、地球社会のよりよき企業市民として貢献すべく、邁進してまいります。

参考文献

- (1) 小林邦雄ほか. 1,200 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.240-243.
- (2) 佐藤和久ほか. SiC ハイブリッドモジュールを搭載した 690 V 系列インバータ「FRENIC-VG スタックシリーズ」. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.1, p.32-35.
- (3) 梨子田典弘ほか. メガソーラー用パワーコンディショナ向け All-SiC モジュール. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.244-248.
- (4) 大島雅文ほか. All-SiC モジュール搭載のメガソーラー用 PCS「PVI1000AJ-3/1000」. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.1, p.13-17.
- (5) 館憲弘ほか. 富士電機のトップランナーモータ——「プレミアム効率モータ」の損失低減技術——. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.1, p.36-40.
- (6) 宇津野良ほか. インバーター体型モータ. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.1, p.41-45.
- (7) 近藤史郎ほか. ソリューションを支える計測・制御技術の現状と展望. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.1, p.4-8.
- (8) 坂田昌良ほか. アークシミュレーション技術. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.3, p.216-221.

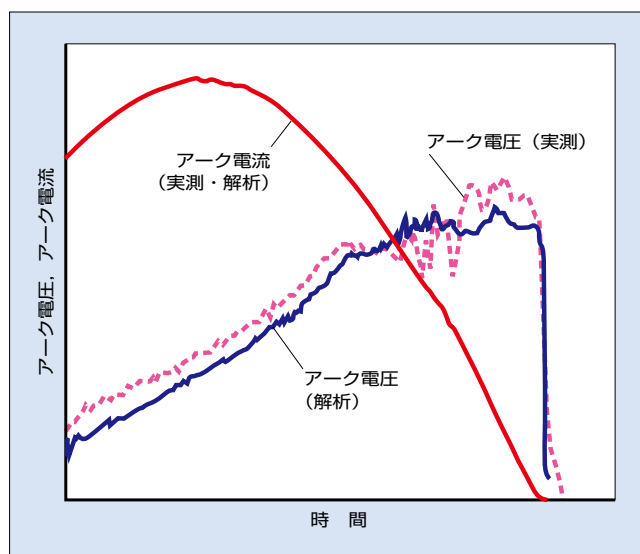


図 14 遮断時のアーク電流とアーク電圧

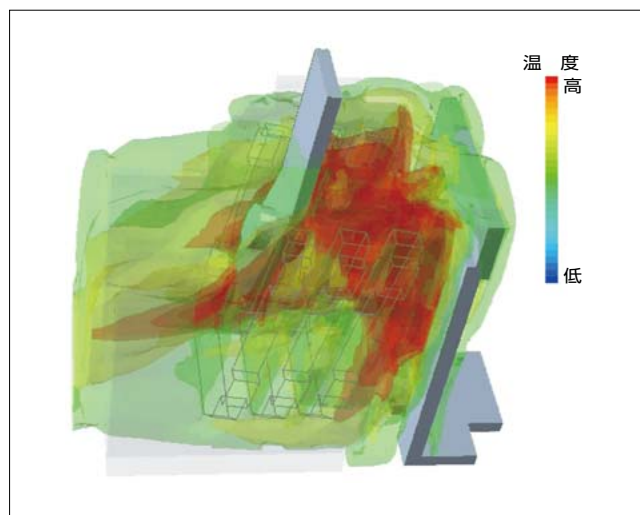


図 15 サーキットプロテクタのアークシミュレーション結果



*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。