

パワーエレクトロニクス機器の現状と展望

Power Electronics: Current Status and Future Outlook

友高 正嗣 TOMOTAKA, Masatsugu

1 まえがき

現代社会において、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、小型の携帯機器をはじめ、産業プラントやメガソーラーに代表される社会インフラなど社会の隅々まで浸透し、なくてはならぬものになってきている。富士電機は、コア技術であるパワデバイス技術とパワエレ技術を制御技術やアプリケーションと組み合わせ、エネルギーを効率的かつ安全に供給・利用する製品の開発に注力している。図1に富士電機のパワエレ機器とその応用分野を示す。本稿では、パワエレ技術の最新動向、富士電機の取組みおよび応用製品について述べる。

2 市場ニーズと技術のトレンド

2.1 小型・軽量化

パワエレ製品に限らず、あらゆる製品で小型・軽量

化が求められている。特に鉄道車両のような移動体においては、限られたスペースに機器を設置しなければならないという小型化と、機器の質量がそのまま車体の質量に加わるために車体の最大積載量や加減速性能を確保するという点からも軽量化が必須である。

2.2 省エネルギー・高効率化

地球温暖化を防止する上で温室効果ガスの排出を抑制する必要があり、再生可能エネルギーの活用と省エネルギー（省エネ）が重要な課題となっている。

メガソーラーで発電された直流電力を送電系統に連系するための直流-交流変換や、変動の大きな再生可能エネルギーを安定して供給するためのスマートグリッドの蓄電設備における直流-交流の相互変換などで、パワエレ機器はなくてはならない存在となっている。これらの設備において、パワエレ機器の変換効率システムとしての省エネはもちろんのこと、事業性の点からも最も重要な要件となっている。

一方、ソーシャルネットワークを提供するクラウドサービスなどのインターネット社会を支えるデータセンターは、年々普及の拡大が進んでおり、大型データセンターに対応する大容量の無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）のニーズが増えている。データセンターのエネルギー消費量の増大が目目されている中、特に北米ではUPSの効率、中でも実負荷時の効率がUPSを選定する上での指標として着目されてきている。一方、国内市場では2000年前後に集中的に投資されたIT設備の更新時期に差し掛かり、旧製品との互換性を担保しながらも高効率の製品への置換えが要求されている。

また、これまでは機能や性能が重視されてきた可変速駆動分野でも、省エネを志向する世界的な動きの中で、国内ではトッランナー方式による高効率モータ

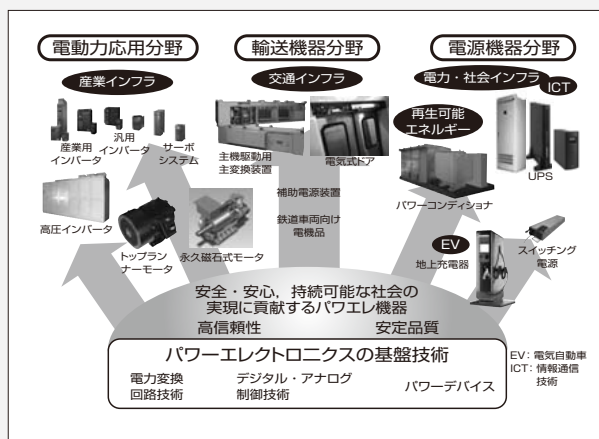


図1 富士電機のパワーエレクトロニクス機器とその応用分野

(*1) トッランナー方式

「エネルギーの使用の合理化等に関する法律」（省エネ法）に基づいた機器の効率基準を策定するに当たり、基準を設定する時点で最も省エネ性能が優れている機

器（トッランナー）の性能以上に設定する日本独自の制度である。1999年の省エネ法の改正により導入された。2014年度時点で、エアコンやテレビ、電気冷蔵庫、蛍光灯・LED照明機器など、28品目が対象

となっている。三相誘導電動機（産業用モータ）は、2013年10月にトッランナー制度の対象となった。

の普及が促進されている。海外においても1,000 kW以下のモータを駆動するインバータシステムの効率を規制する欧州規格が制定され、2018年にはIEC（国際電気標準会議）規格として発効する予定である。

2.3 ニーズの多様化

パワエレ技術を適用した製品の普及が進むにつれ、パワエレ製品に対する市場ニーズも多様化してきている。汎用インバータを例に取れば、これまでは機能や性能に基づく製品系列が主であったが、最近では、用途や設置環境に応じた製品の提供が望まれている。例えば、マシンルームレスが主流となっている中低層エレベータ向けの駆動用インバータでは、小型で薄型の形状が求められている。また、ユーザやそのアプリケーションごとに多様な機能を実現する必要がある。

2.4 パワーデバイス

50年以上にわたり、パワエレ機器にはシリコン（Si）半導体を材料とするパワーデバイスが使われてきた。現在主流のIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor^{(*)2}）は、デバイス構造、加工技術、ウェーハ技術などの進歩により、図2に示すように低損失化が進み、損失が

初期の半分以下となっている。しかしながら、現在ではSi半導体の性能限界に近づき、これ以上の大きな性能改善が期待できないことから、飛躍的な特性改善をもたらすパワーデバイスの登場が期待されてきた。

これに対し、ワイドバンドギャップ半導体が飛躍的な低損失、高周波動作、高温動作などを実現する半導体材料として期待されている。近年、ワイドバンドギャップ半導体の一つであるSiC（炭化けい素^{(*)3}）がようやく実用域に達し、SiCパワーデバイスとその応用機器の普及が待たれている。

2.5 国際標準化

市場のボーダーレス化により、国際標準はますます重要性を増してきている。パワエレ製品が準拠すべき国際規格も増加の一途をたどっており、絶縁やEMC（Electromagnetic Compatibility：電磁両立性^{(*)1}）はもとより、データ伝送、機能安全、効率など多岐にわたってきている。また、EMCのエミッションの限度値のように、これまでの規制に加えて、対象となる周波数範囲が拡大されるとともに、GCPC（Grid Connected Power Converter：系統電力変換装置）やWPT（Wireless Power Transfer：無線電力伝送^{(*)4}）など最新の技術を対象とする規格の整備が進められている。

一方で、WTO/TBT（World Trade Organization：世界貿易機関、Technical Barriers to Trade：貿易の技術的障害）協定に基づいて、国際規格を地域標準とする動きもあり、中国の製品安全認証制度（CCC：China Compulsory Certification）はその好例である。このため、国際規格や地域標準に準拠していることが、グローバル市場で製品展開を行う上での不可欠な条件となっている。また、規格の第三者認証はその製品の品質や性能の評価基準としての側面も持っている。この結果、近年では規格に適合していることについての自己宣言または第三者認証を取得するための行為・期間が製品開発の過程で大きなウエイトを占めるようになってきている。

一方で、これまでどちらかという受け身でありがちであった国際標準への対応を、グローバル戦略や

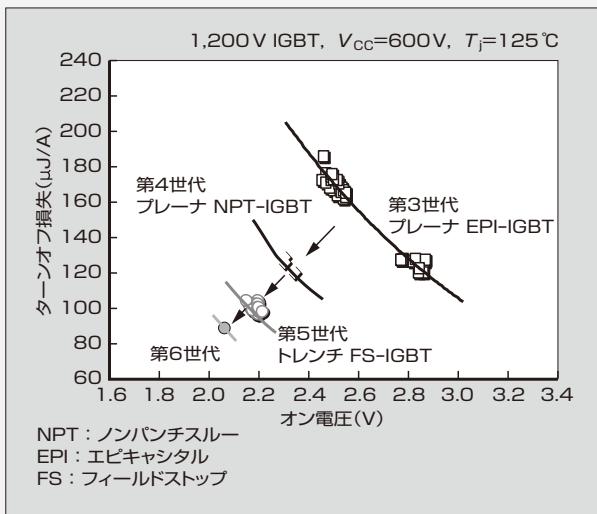


図2 Si-IGBTの世代と特性の変遷

(*)2 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。GTOやパワートランジスタなどの自己消弧型素子は電流駆動であった。これに対してIGBTは、電圧駆動であるため、駆動回路が簡素で制御が容易であることや高速動作が可能であることなどから一気に普及し、現在ではスイッチング電源などの低圧・小容量機を除くほとんどのパワエレ機器で採用されている。

(*)3 SiC

Si（けい素）とC（炭素）の化合物である。3C、4H、6Hなど多くの結晶の構造多形が存在し、構造によって2.2～3.3eVのバンドギャップを持つワイドギャップ半導体として知られる。絶縁破壊電圧や熱伝導率が高いなどパワーデバイスとして有利な物性を持つため、高耐圧・低損失・高温動作デバイスが実現できるとして実用化が進められている。

(*)4 WPT

Wireless Power Transferの略であり、ワイヤレス（無線）電力伝送ともいう。インバータなどを利用して、電力をいったん高周波の交流電力に変換し、一次コイルで高周波の電磁波に変換し、これを後述する物理現象を利用して二次コイルに伝達し、交流電力に変換することで電気エネルギーを非接触で伝達する技術である。利用する物理現象としては、電磁波の周波数によって電磁誘導や磁界共振、電界結合、電界共振、電波放射などがある。従来は家電製品やモバイル機器などで使用されてきたが、最近では電気自動車の充電システムとして期待されている。

知財戦略の一環として積極的に取り組む機運が高まってきた。

③ 技術開発における富士電機の取り組み

3.1 新パワーデバイスの開発と応用

富士電機では、SiC を使ったパワーデバイスに着目し、独立行政法人 産業技術総合研究所が主導するプロジェクト TPEC (Tsukuba Power Electronics Constellations) に参画して研究開発を進めている。現在、1,000 V 級の SiC パワーデバイスが実用の域に達し、富士電機は 6 インチウェーハを用いる前工程・後工程一貫生産ラインを松本工場に立上げ、2014 年 4 月から稼働している。

富士電機は、SiC パワーデバイスの特徴である低損失や高周波動作を生かした小型・軽量の製品を市場に提供している。さらに、高温動作や高耐圧化など SiC の潜在的な能力を十分に生かした技術・製品の開発を進めている。

富士電機は、パワエレ機器を構成するパワーデバイスとその応用製品の両者を手掛ける世界的にも数少ない企業の一つである。富士電機ではこの利点を生かし、デバイス部門とアプリケーション部門が連携して新技術、新製品の開発に努めている。上述の SiC パワーデバイスに加えて、Si パワーデバイスについても商品企画段階から、デバイス部門と応用部門が連携して開発を進めている。

3.2 プラットフォーム

グローバル化と市場ニーズの多様化に応じた製品機種群の増加に対応するため、パワエレ技術や製品の開発ニーズが増加し、そのための開発要員の確保と開発のスピードアップが重要な課題となっている。富士電機では、パワーデバイスで構成される主回路部やその制御回路など、製品群間で共通する部分をプラットフォームとして開発し、これに基づいて新たな機種群の展開や容量系列の拡大を行っている。多様な機種群で構成される汎用インバータをはじめ、UPS や鉄道車両搭載機器など、あらゆるパワエレ分野でプラットフォーム化とそれに基づいた製品展開を進めている。

3.3 開発環境の整備

パワエレ技術の開発におけるスピードアップと完成度の向上のため、富士電機はシミュレーション技術の

活用を積極的に行っている。

従来は、制御系のシミュレーション、ならびに熱冷却、電磁ノイズの不要輻射(ふくしゃ)などにおける個々の物理現象に対するシミュレーションが主流であった。パワエレ機器では、パワーデバイスの所定の動作を実現する配線構造の設計、パワーデバイスの駆動条件とパワーデバイスの発生損失(冷却系への入力)、電磁ノイズの不要輻射など相互かつ密接に関連がある。このため、組合せ試験の結果に応じて、動作条件のトレードオフによる再設計など手戻りが発生することが避けられない状況であった。

富士電機では、この状況を打開するため、デバイスシミュレーションを核にしたパワエレ機器のシミュレーション技術を開発した。この技術を活用することで、開発のごく初期段階でパワエレ機器の効率や寸法を見極めることができるとともに、試作とその評価のための工数削減による開発期間の短縮が可能となった(66 ページ“パワーエレクトロニクス機器のシミュレーション技術”参照)。

3.4 グローバル化と国際標準

グローバル市場を対象にするパワエレ機器にとって、国際規格に準拠することは必須である。米国の UL 規格対応や欧州の CE マークを付けるための EMC 対応は一般的になってきている。近年はこれらに加えて、機能安全規格(IEC 61508)が重要な準拠規格の一つになり、今後はさらにモータやインバータの効率規制が重要な要件になりつつある。特に機能安全規格への対応では、個々の製品の技術や品質のみならず、それらを開発するプロセスも評価の対象となっている。

富士電機では製品の国際標準化対応として、規格による規制が始まる以前の段階から、その規格に準拠するための技術開発や社内体制の整備を推進することで、規制の施行に先行して製品やサービスを提供できるように努めている。また、IEC における規格制定審議などの国際標準化活動における人的貢献を強化するために目標を定め、活動を推進している(71 ページ“パワーエレクトロニクス機器の国際標準化活動”参照)。

④ 製品開発

4.1 SiC 適用製品

SiC パワーデバイスの実用化に合わせ、第一弾として Si-IGBT と SiC-SBD (Schottky Barrier Diode)

(※ 5) SBD

Schottky Barrier Diode の略である。金属と半導体との接合によって生じるショットキー障壁を利用した整

流作用を持つダイオードである。その優れた電気特性により、SiC-SBD の FWD (Free Wheeling Diode) への適用検討が始まっている。少数キャリアも利用す

る PIN ダイオードと比較して、多数キャリアのみで動作する SBD は逆回復スピードが速く、逆回復損失も小さい。



図3 SiC モジュールとこれを搭載した製品

とから成るハイブリッドモジュールを 200 V 系・400 V 系の汎用インバータに搭載した。次に、1,200 V 耐圧の All-SiC モジュールを搭載したメガソーラー用パワーコンディショナ（PCS：Power Conditioning Sub-system）^(※6) および 1,700 V 耐圧の SiC ハイブリッドモジュールを搭載した 690 V 系列インバータを製品化した（図 3）。今後、SiC パワーデバイスの電圧クラス、電流容量の拡充を図るとともに、その適用技術と応用製品の拡充に向けた開発を推進していく。

4.2 電動力応用機器分野

多様な機種群を持つ電動力応用機器分野では、市場特性に合わせた新商品の展開のため、早くからプラットフォームに基づく開発方針を打ち出し、新製品の開発を加速させて早期の市場投入を行っている。「FRENIC-HVAC/AQUA シリーズ」は、収納盤なしで使用されることの多い北米やアジア市場の空調・ポンプ用途を狙ったソリューションで、防じん・防水構造を強化した IP 55 対応^(解説4)がその特徴である。クレーン、成形機、自動試験機など、今後拡大が期待される市場に向けた機種として、スタックタイプのインバータを開発した（32 ページ「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」」参照）。この他、SiC パワーデバイスを搭載した製品開発や高圧インバータの系列拡充なども行い、さまざまな用途や利用環境における最適なソリューションを提供している。

また、グローバル市場での製品展開に不可欠な操作パネルの多言語化においては、パソコン上の言語作成ツールで作成した言語データを操作パネルにダウン

ロードする方式とし、多くの種類の言語表示に対応しやすくした。

さらに、工場設備や加工機の用途において顧客の多様なニーズに応えるために、カスタマイズロジック機能を搭載した「FRENIC-Ace シリーズ」を製品化した。用途に応じて顧客が自らインバータ制御のプログラミングを行うことができる。プログラミングのための部品として、豊富なロジック・タイマ部品、アナログ演算器、デジタル・アナログ混在部品などを用意した（27 ページ「グローバル対応の汎用インバータ「FRENIC-HVAC/AQUA シリーズ」「FRENIC-Ace シリーズ」」参照）。今後の機種にも、部品の種類や最大ステップ数の拡大など利便性の向上を図る予定である。

機器やシステムの安全を確保することを目的とした機能安全規格（IEC 61508）に関しては、規格への準拠を進めており、システムの安全性能を表す尺度 SIL 3（Safety Integrity Level：安全度水準）に対応したインバータの開発を行った。SIL2 から SIL3 にクラスを上げるに当たり、診断率の向上や開発プロセスの強化を実施している。今後さらに、安全機能の対応機種の拡大や安全バスへの対応を行っていく。

4.3 回転機分野

海外では IEC で規定されるモータ単体での効率クラスを重視している。北米ではほとんどが IE2（高効率）と IE3（プレミアム効率）で占められ、欧州でも IE2 の普及が進んでいる。これに対して国内では、インバータを組み合わせたシステムとしての効率を重視してきたことから、ほとんどが IE1（標準効率）で、IE2 や IE3 の普及が遅れていた。富士電機は、トップランナー制度に基づき IE3 対応の「プレミアム効率モータ」を開発した（36 ページ「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——」参照）。

空調設備では省エネのためのインバータ制御が増加しており、インバータの設置スペースの確保が課題となっている。富士電機は、得意とするパワー半導体技術とパワエレ技術のシナジーによるインバータ搭載型モータの開発を進めている（41 ページ「インバータ一体型モータ」参照）。

4.4 輸送機器分野

鉄道車両搭載機器の分野では、移動体に搭載される

(※6) PCS

Power Conditioning Sub-system の略である。太陽電池や燃料電池で発生した直流電圧の電力を交流電力に変換する機器である。一般には、直流を交流に変換す

るインバータで構成される。日射量に対する太陽電池の出力特性や燃料電池の運転特性などに合わせて、最大電力を出力するように制御する。また、停電時には単独で運転を継続することによる感電事故を防止する

ための停電検知機能、ならびに短時間の電圧低下（瞬低）に対しては運転を継続する機能を備えている。

機器の重要課題の一つとして、小型・軽量化が求められている。

新幹線電車の推進システムである主変換装置^(*)は、常にその時代の最先端の技術が適用されてきた。東海旅客鉄道株式会社（JR 東海）の最新の新幹線電車 N700A では、低損失のスナバ回路レス方式の採用による高効率化と軽量化に加えて、走行風自冷方式によるブロワレス方式で、300 系新幹線電車用主変換器に比べて、体積で 42%、質量で 59% の小型・軽量化を達成している。

架線から取り入れた高圧の電力を変換して空調や照明などの車内設備用の低圧電源を供給する補助電源装置^(*)においても、一層の小型化と軽量化が求められている。これまでは、補助電源装置用変換器から出力される商用周波の電力をトランスで絶縁して供給する方式が主流であった。富士電機は、パワエレ技術を駆使して、kHz オーダーの高周波交流電力を高周波トランスで絶縁したのち、商用周波数や直流の電力に変換して供給する高周波絶縁方式による補助電源装置を開発し、大幅な小型・軽量化を実現している（図 4）。

鉄道車両は、SiC の実用化と普及が最も期待されている分野の一つである。発生損失低減による冷却構造の小型・軽量化や、さらなる高周波動作による絶縁変圧器、フィルタリアクトルの小型・軽量化が期待されており、富士電機もその開発を推進している⁽⁴⁾（46 ページ“鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器の小型・軽量化技術”参照）。

車両用電気式ドアでは、実績のあるリニアモータ方式のドアに加えて、省エネ・軽量化の点で優れた



図 4 高周波絶縁方式補助電源装置

回転型の扁平（へんぺい）モータ FCPM（Flat Cup Permanent Magnet Motor）を搭載したドアを製品化し、国内市場をはじめ、東南アジアや北米市場に展開している。乗客の安全に直接関わるドアの開閉動作や戸閉状態の保持は、車両用電気式ドアにおいてもっとも重要である。富士電機は、特に北米市場で評価を得ている高い信頼性に加えて、国際規格や地域標準などに準拠しながら、より高い安全性の実現に努めている（50 ページ“鉄道車両用ドアの最新動向と安全・信頼性技術”参照）。

4.5 電源機器分野

UPS などの電源機器分野では、近年、これまで重視されてきた信頼性や機能性能面だけでなく、高効率と省スペースが最も重要なニーズになってきている。富士電機では、RB-IGBT^(*)（Reverse-Blocking IGBT：逆阻止 IGBT）を用いた AT-NPC（Advanced T-type Neutral-Point-Clamped）新 3 レベルインバータ^(*)などの最新のデバイス技術と回路技術を融合した新技術、および制御技術を活用し、高効率で省スペースの製品を提供している。

北米向け大容量 UPS は、富士電機独自の RB-IGBT を採用した高効率大容量 UPS であり、設置面積の小ささはトップクラスであるだけでなく、実用領域に当たる中負荷時の効率が高いことが特徴である（18 ページ“北米向け 3 レベル適用大容量高効率 UPS 「7000HX-T3U」”参照）。

All-SiC モジュールを採用した PCS は、高効率であることに加え、パワーデバイスの電流電圧定格を最大限に活用することで装置を小型化した。これまでは、分割して搬送し、現地地で組み立てる必要があった 1 MW クラスにおいて一体型での輸送を可能にし、据付けを含めた総合的な費用の合理化を実現している（13 ページ“All-SiC モジュール搭載のメガソーラー用 PCS 「PV1000 AJ-3/1000」”参照）。

また、多様な市場ニーズに対して短時間で製品を開発し、顧客に提供できるよう、プラットフォーム化を推進している。

(*) 主変換装置と補助電源装置

鉄道車両の分野では、車両の走行に関わる機器には“主”を、それ以外の機器には“補助”を機器名称に付けることがある。新幹線電車などのインバータ駆動の電車では、走行用のモータを主電動機といい、これを駆動するためのコンバータやインバータを主変換装置という。また、架線や第 3 軌条から受電した高圧電力を、車両の空調機や照明機器などで使用する低圧の商用周波電力に変換する変換器は、それ自身が独立した機器であるが、主変換装置と区別して補助電源装置という。

(*) RB-IGBT

Reverse-Blocking Insulating Gate Bipolar Transistor の略である。逆阻止 IGBT ともいう。逆方向（エミッタ-コレクタ間）の耐圧を持った IGBT である。通常の IGBT 素子は逆印加方向の耐圧を持たないため、ダイオードを挿入する必要があるが、RB-IGBT は順方向と同じレベルの耐圧を持っているため、ダイオードが不要になる。

(*) 新 3 レベルインバータ

3 レベル電力変換は、電力変換装置の電力損失を大幅に低減させた新しいマルチレベル変換回路の一つである。新 3 レベルインバータは、この 3 レベル電力変換方式を用いたインバータである。詳細は、78 ページ「解説 6 “3 レベル電力変換方式”」を参照。

⑤ あとがき

パワーエレクトロニクス（パワエレ）機器を取り巻く現状と動向、富士電機におけるパワエレ技術とその応用製品の開発状況について述べた。

パワエレ機器は、その主回路を構成するパワーデバイスとマイコンなどの制御デバイスの進歩により、劇的な進化を遂げてきた。現在実用化が進む SiC は、次なる変革を引き起こすキーデバイスとして期待されている。一方で、国際標準化に代表されるグローバル化の動きは、パワエレ技術の在り方はもとより、ビジネスの形態をも含めた変革をもたらす可能性を秘めている。

富士電機はこれからも、環境にやさしい豊かな社会づくりのため、より多様な社会のニーズに応える製品

とサービスを提供していく所存である。

参考文献

- (1) 牧野亮平ほか. “All-SiCデバイス適用による高周波絶縁方式鉄道車両用補助電源装置の高効率・小形化検討”. 平成27年電気学会全国大会 5-121.

*本稿に記載した〈解説1～5〉は、76～78ページ「解説」を参照のこと。



友高 正嗣

富士電機株式会社執行役員。パワエレ機器本部長。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。