産業用パワーエレクトロニクスの現状と展望

特集

川村　逸生（かわむら　いつお）　　笹川　清明（ささがわ　きよあき）

1　まえがき

パワーエレクトロニクス（以下，パワエレという）機器は社会のさまざまな分野で活躍している。用途・容量ともに幅広く，情報機器に内蔵される50 W の DC-DC コンバータ，500 kW の無停電電源装置（UPS），5,000 kVA の圧延機用インバータ，アルミ精錬に使われる700 MW の整流器もパワエレ機器である。必要技術もマイクロプロセッサの技術から，回転機や大型変圧器の技術に及ぶ。

このようにパワエレ機器はきわめて多様な製品群であり，しかも今後ますます多様化が進むと考えられる。このような環境下にあるパワエレ機器を，いかに限られた経営資源でタイムリーに開発していくかが，パワエレ機器メーカーの大きな課題になっている。

かつて W. E. Newell 氏によって定義された以下の三つのパワエレ技術要素が，基本的に現在でも有効である。

(1)　エレクトロニクス技術

半導体（パワーと制御）とそれらの組合せ回路技術

(2)　制御技術

古典制御や現代制御などの理論とパワエレ機器制御技術，プラント制御技術やネットワーク化技術

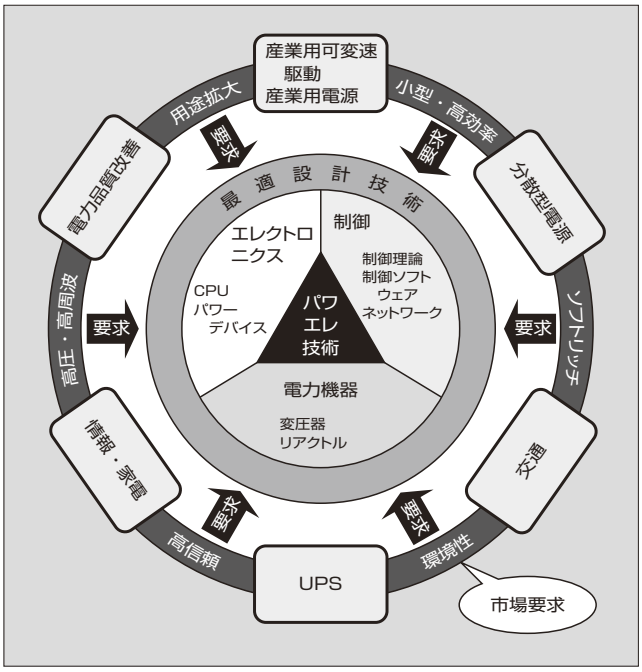
(3)　電力機器技術

変圧器，リアクトル，回転機のハードウェア技術

近年，パワエレ装置には小型・省エネルギーや電力エネルギーの高度利用といった本来の特徴をより高い次元で実現させる要求が高まっており，この3技術要素に対して，最適化が追求されている。このため，各機種に共通の最適設計ツールや技術を用意し，それらを活用し組み合わせたうえに各パワエレ機器特有の技術を付加して製品を開発する手法が望まれている。特に，前述のようにプラントで使われるパワエレ機器は用途，容量とも多岐にわたり部品の共通化が困難であることから，設計ツールや技術を共通化することが有効で，これによって大幅な開発スピードアップと製品品質の向上が期待できる。**図1**にこの開発方法の概念図を示す。

富士電機は，この開発方法で必要な設計ツールや技術を拡充してきた。本稿では，その中から設計ツールの概要紹介と個別機種における市場動向，および富士電機の取組みを紹介する。詳細については，本特集の別稿を参照されたい。

図1　パワエレ機器の開発方法の概念図



2　パワエレにおける設計ツール

2.1　ソフトウェアの高品質化への取組み

パワエレ機器はソフトウェアへの依存性が増加している。ソフトウェアの開発期間短縮と再利用向上のため，富士電機は独自のツールを開発し，適用機種への展開を推進している。また，品質向上のために CMM（Capability Maturity Model）手順に従った開発プロセスの構築に取り組んでいる。

(1)　プログラム CAD（Computer Aided Design）

図面（ドキュメント）から実行可能なプログラムを自動

川村　逸生

大容量パワーエレクトロニクス装置のエンジニアリング，設計，品質保証に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部パワエレ開発センター長。電気学会会員。

笹川　清明

パワーエレクトロニクス製品の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社エレクトロニクス技術研究所長。電気学会会員。

生成する手法が実用化されつつある。パワエレ機器には，μs オーダーの高速応答をする電気系の制御が要求され，制御ソフトウェアにも高速応答が要求される。そのため，十分な性能を発揮できる制御プログラムを，一般的なツールにより自動生成させることは困難であった。そこで，富士電機ではこれまでのパワエレ機器の制御ソフトウェア製作のノウハウや，コード自動生成技術などを結集し，パワエレ機器向けに特化したツールを自社開発した。現在，このツールを順次製品設計に適用しており，コーディングの工数削減による省力化や，プログラムの図面化とコード生成の自動化による品質向上の効果により，効率的に開発を進めている。**図 2** に Visio〈注〉を使用したプログラム CAD の操作画面を示す。

(2)　ソフトウェアプロセス管理技術

パワエレ機器のソフトウェア品質を向上させる基盤技術の開発を目的とし，CMM をベースとしたプロジェクトプロセス技術を開発した。この技術を応用製品開発プロジェクトに適用することによって，公認エバリュエータから CMM レベル 2 の認定を受けた。また，運用面での効率化を狙いとして，プロジェクトプロセス技術の管理ツールの統合化およびプログラム CAD との連携機能の開発を行った。

〈注〉Visio：米国 Microsoft Corp. の米国およびその他の国における商標登録

図 2　プログラム CAD の操作画面

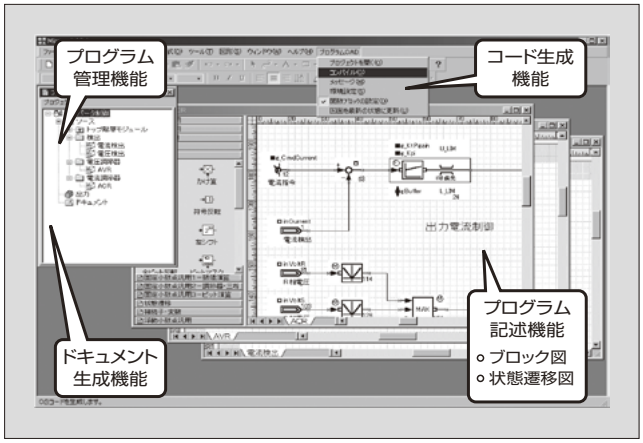
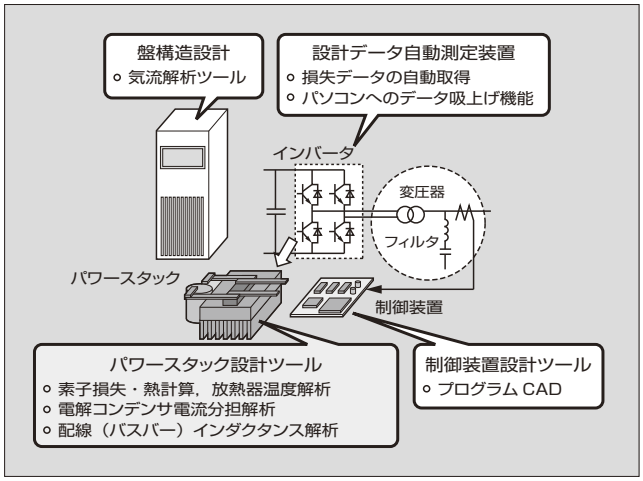


図 3　主回路シミュレーションツール



2.2　主回路設計技術

性能向上が著しいパワーデバイスを用いた装置の小型化ニーズに応えるために，パワーデバイスのスイッチング特性を把握し，その特性に応じた回路・構造の設計技術が重要になっている。そのために，主回路設計を精度よく，短期間で実現するための専用シミュレーションツールの開発を進めている。さらに電源装置においては，電源設計の自動化を行う開発ツールを開発し，設計と評価のスピードアップを図っている。

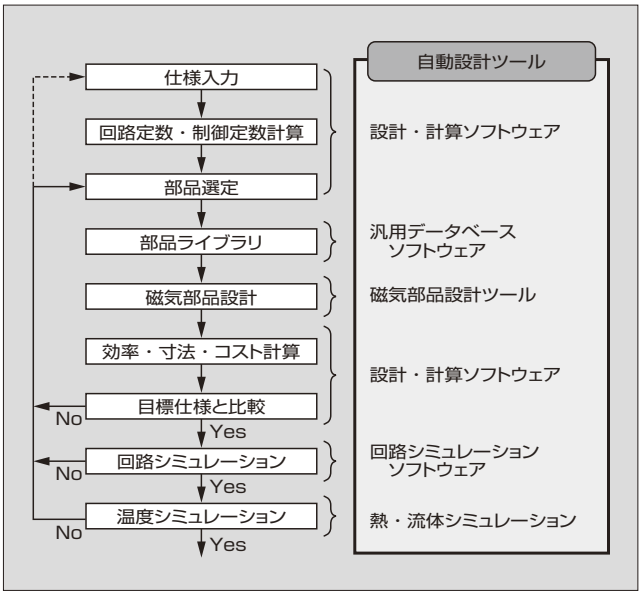
(1)　主回路シミュレーションツール

今回開発したシミュレータは，IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュール並列接続時の配線構造に起因した電流アンバランス，素子特性ばらつき，ならびにモジュール内のチップの位置を考慮した損失および温度計算ができる拡張機能を有しており，一般的に実施されている簡易的な計算方法と比べて，より正確な温度や損失値を算出することが可能となっている。**図 3** に主回路シミュレーションを含む自動設計ツールの概念図を示す。

(2)　ユニット電源の自動設計ツール

ユニット電源はカスタム製品が多く，顧客の要求に応じてその都度，設計・製作しているため，電源の設計を自動化する要望が高まっている。今回開発した自動設計ツールは，要求仕様を入力することで，プログラムファイルによって設計を自動的に実行する。得られた設計結果は回路シミュレータに反映され，直ちに動作を確認できる。シミュレーション結果はプログラムファイルに反映され，波形表示やデータの解析が可能である。さらに，磁気部品

図 4　自動設計ツールのフロー



の仕様・各部の損失・パワーデバイスの温度・効率特性も瞬時に算出することができる。また，コンピュータを使って設計するので，繰返し計算や反復計算などを容易に行うことができ，最適設計が可能である。最後に，仕様・設計結果・シミュレーション解析結果などの一連の設計履歴を一つのファイルとして保存するので，製品のトレーサビリティを容易に確保できる。**図 4** に自動設計ツールのフローを示す。

3　市場動向と製品

3.1　産業用可変速駆動装置

産業プラント分野に適用される可変速駆動装置は交流化が進んでいる。市場はインバータ装置出力の高電圧化，単機大容量化を求める一方で，装置の小型軽量化，高密度実装化を要求している。メーカーは用途や電動機出力に応じてインバータに適用するパワーデバイス，主回路構成，電動機電圧，制御ソフトウェア，制御性能を最適に選定しその要求に応じている。

富士電機は，産業プラント向け可変速駆動装置としてIGBT などを用いたインバータを製品系列化し，素材産業，一般産業設備，他の設備へ提供している。

鉄鋼設備の条鋼主機圧延機，セメント設備のキルンなどに用いられる数百 kW ～ 2,000 kW クラス電動機用へは，IGBT を用いた 3 レベルの中容量インバータを適用する。インバータ容量は 1,200 kVA，2,000 kVA をそろえ，多重構成により最大 6,000 kVA まで対応できる。

圧延設備補機，鉄鋼プロセスライン，一般産業に多く用いられる誘導電動機へは，IGBT を用いた 2 レベル AC400 V 小容量インバータを適用する。インバータ容量は 900 kVA まで系列化している。300 kVA まではインバータをユニット形として自立盤へ多段積みし，盤設置面積を少なくできるように工夫しており，小容量ユニットは高さ 2,350 mm のインバータ盤へ 12 段積みできる。インバータユニット間は直流配電形を採用している。インバータを接続する系統の力率や高調波要求に応じてダイオードコンバータと IGBT を用いた PWM コンバータを，要求される速度精度や用途に応じてベクトル制御，センサレスベクトル制御，V/f 一定制御から，それぞれ選択できるようにしている。

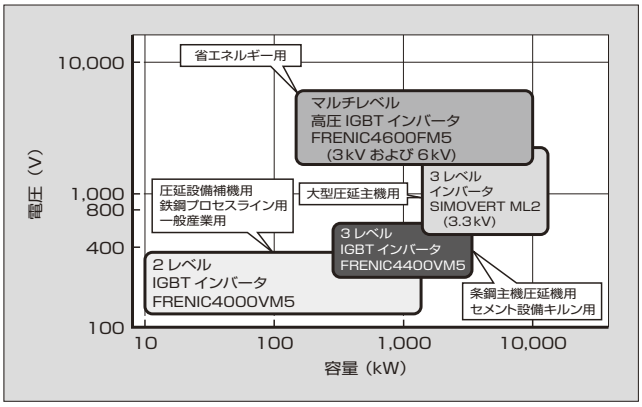
大型圧延主機へは 10 MVA 3.3 kV 3 レベルインバータを適用する。これはドイツのシーメンス社が製作し，日本国内で富士電機が販売している。鉄鋼や非鉄圧延主機へ適用しており，

(1)　水冷による設置面積の縮小化
(2)　高入力力率，低入力高調波
(3)　高速応答，低トルク脈動

の特長を有する。

生産設備の省エネルギー用途として，出力電圧 3.3 kV および 6.6 kV の誘導電動機を直接駆動できる高圧インバータを製品系列化し，多くの納入実績を有している。これは

図 5　インバータの適用マップ



汎用 IGBT で構成する単相 3 レベルインバータを多段接続した主回路構成である。容量系列を 10 MVA までそろえ，

(1)　多相ダイオード整流による高調波抑制
(2)　出力電圧 6.6 kV で 17 レベルの低サージ電圧
(3)　高い変換効率

の業界トップレベルの特長を有する。また，この高圧インバータは大容量同期電動機の駆動にも適している。今後も省エネルギーを目的とした高電圧出力のインバータの適用は拡大すると期待され，製品系列と機能の拡張を進めている。

上記のとおり，富士電機では小容量から大容量までのインバータ製品を豊富にそろえている。インバータの適用マップを**図 5** に示す。

一方，既設設備で使用されている直流電動機駆動用サイリスタ制御装置は，老朽化更新が数多く行われている。これに対応するためにデジタル制御形サイリスタ制御装置を製品系列化しており，数 kW から数千 kW までの直流電動機を駆動できる。小容量電動機用サイリスタ制御装置はユニット構造形としており，既設盤を流用して盤内機器だけを交換する方法により短時間更新を可能としている。

また，永久磁石を用いた出力 100 kW 級，回転数 20,000 r/min 以上の高速同期電動機も製品化している。これは機械との一体形構造であり，ユーティリティ設備の省エネルギーへ貢献するものと期待される。

3.2　UPS

UPS は，情報システムやネットワーク機器などのミッションクリティカルなシステム・設備・装置を電源障害から保護するための電源装置であり，高効率，小型軽量，高信頼性が要求されている。最近はこれに加えてネットワーク対応機能が要求されている。

富士電機は，0.5 kVA のミニ UPS から 2,000 kVA の大容量 UPS まで幅広い容量の UPS をシリーズ化している。**図 6** に富士電機の UPS 系列マップを示す。

UPS には，常にインバータを介して安定した電力を負荷に供給するオンライン方式と，通常は商用電源から電力を負荷に供給し停電時のみインバータから電力を供給する

図 6　UPS 系列マップ

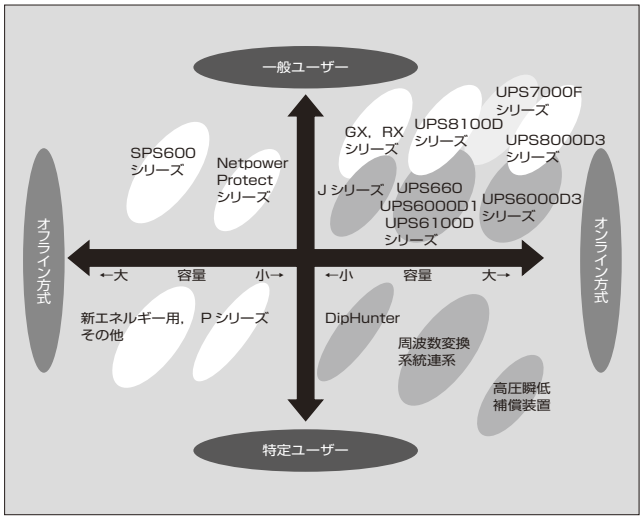
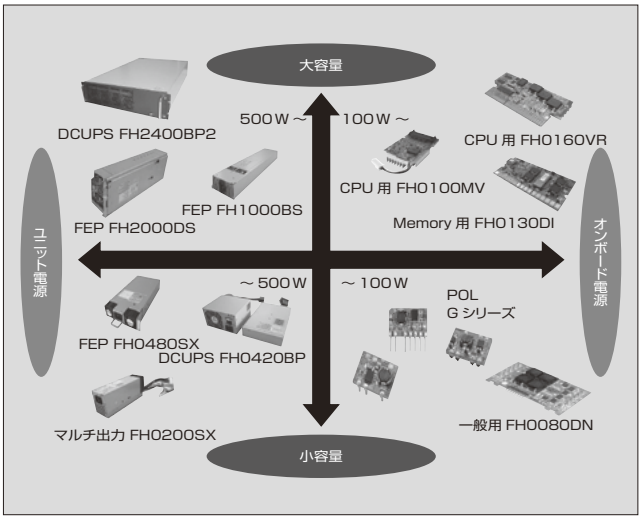


図 7　内部電源系列マップ



オフライン方式とがある。オンライン方式では，出力電圧の安定性とランニングコストの低減が要求される。この要求に対して，ミニ UPS では「デュアルコンバージョン方式」を採用した GX・RX シリーズ，中大容量 UPS では「デュアルプロセッシング方式」を採用した 8000D3 シリーズや「パラレルプロセッシング方式」を採用した 8100D シリーズを用意している。さらに高い信頼性を要求される用途には，並列冗長機能を具備したシリーズを用意している。また，半導体製造装置などでは，長時間の停電ではなく瞬時電圧低下に対する対策が要求される。このような要求に対しては，瞬時電圧低下耐量規格 SEMI-F47 に適合した瞬時電圧低下補償装置を UPS 応用装置として準備している。

次に，コンピュータサーバシステムに代表される情報通信分野の内部電源（スイッチング電源）の系列マップを**図 7** に示す。情報通信分野では，集積度の向上や動作周波数の高周波化により，小型化・高性能化が進んでいる。そのため，内部電源に対しても高集積化・低電圧化・大電流化や過渡電圧変動に対する高速応答が要求されている。これらの要求に応えるため，給電方式が集中給電方式から分散給電システムへ変化しており，「フロントエンド」「中間バスコンバータ」「POL（Point of Load）」といった電源の提供が主流となってきている。技術開発もこれら 3 種類の電源を中心に実施している。フロントエンド電源では，ここ数年で約 2 倍の電力密度を達成した。中間バスコンバータでは，バックアップ機能に対応するため可変パルス幅制御を採用して高機能化を実現した。また，POL 電源では，国内電源メーカーでは唯一，インテル社のサプライヤーコンタクトリストに登録されており，富士電機の内部電源が高機能・高品質であることを証明していると言える。さらに，内部電源の無停電化を実現した DC-UPS も製品化しており，さまざまな用途への対応を実現している。

3. 3　分散型電源用変換装置

再生可能エネルギーとして注目されている太陽光発電，風力発電は，二酸化炭素（CO_2）抑制を目的にその導入量を大きく伸ばしている。しかし，発電源が自然エネルギーで変動が激しいことから，系統連系する場合は電力を吸収・放出し電力変動を抑制する機能（エネルギー蓄積機能）を持った電力変換装置を必要とする。この電力変換装置には，高速応答や高効率に加え，小型化・低コスト化の面からエネルギー蓄積要素に応じた主回路・制御回路両面での最適システム構成が要求される。具体的には，蓄電媒体（例えば，電気二重層キャパシタ）に適合した電力変換回路構成や充放電制御に不可欠な残存蓄電電力量把握技術などである。

また，太陽光発電や風力発電が接続された分散型電源系では，電力安定化装置や出力制御可能な発電機を用いて地域系統内（マイクログリッド）での需給バランスをとり，商用電源系との連系点での潮流を安定化またはゼロにする系統技術も必要である。

このように，再生可能エネルギーの導入・普及や地域単位での電力需給安定化を図るマイクログリッドの展開には最適な電力安定化装置や電力安定化制御システムが不可欠である。富士電機では，新型電池用変換装置などで培った技術をもとに，電力変換装置そのものの最適化と電力変動に応じた複数の電力変換装置や発電機を統合制御する制御方式を提案しており，一部で実証試験を開始している。

3. 4　産業用電源装置

産業用電源装置には多くの用途があるが，本稿では加熱・溶解，電気分解・精錬について述べる。

加熱・溶解には，誘導加熱，アーク加熱，抵抗加熱がある。近年は，電気炉が燃焼炉に比べて，

(1)　CO_2 の排出量が少ない。

(2)　高速制御で応答が速く製品品質が向上する。

図 8　高周波加熱電源の適用範囲

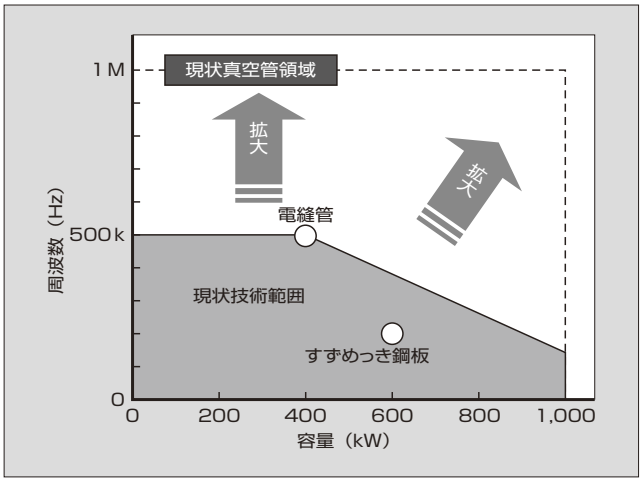
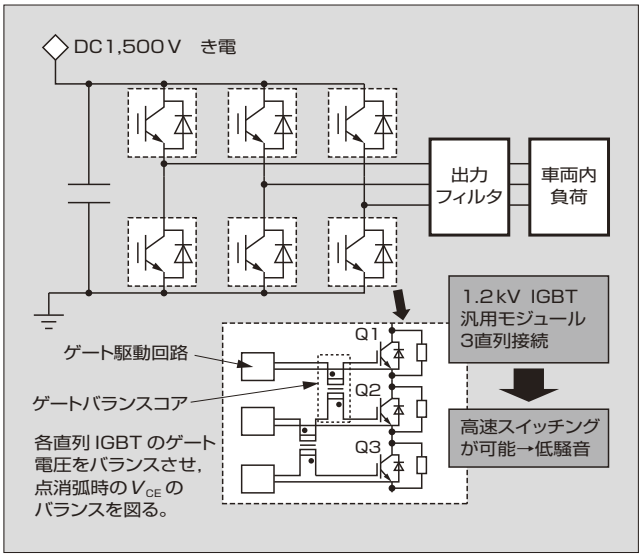


図 9　IGBT 直列接続の主回路方式



ことから電気加熱への転換が進んでいる。誘導加熱では，高品位材料の製造や揮発性有機化合物（VOC）規制に対応することを目的とした加熱需要が増加し，加熱電源の高周波化要求が強まっている。これに対して富士電機は 500 kHz 級スイッチング電源を開発し要求に応えている。電縫管溶接機や鋼管加熱装置への適用は代表例である。さらに適用範囲を広げる目的で，**図 8** に示す領域への拡大を図っている。アーク加熱では，生産性向上を目的として電気炉容量が大きくなっている。そのため電気炉から発生する無効電力も大きくなり系統への影響が増している。高度なシステム社会では系統安定性が重要であり，富士電機は高機能な自励無効電力補償装置を適用し系統問題を解決している。抵抗加熱や直接通電加熱でも系統への影響を小さくするため，高調波の少ない PWM–APR（AC　Power Regulator）や三相不平衡を軽減する三相–単相変換器を開発し，系統安定に寄与している。

電気分解・精錬は，生産性向上のためにセル容量が増加している。富士電機はこれに対し，単器 150 MW 世界最大級の整流器を開発した。さらにプラント巨大化に伴い系統安定性もクリティカルになり，高調波解析などの系統解析を厳密に行い，プラントの安定運転を実現している。また生産管理や機器保守を省力化するためにネットワーク対応も進んでいる。パワエレ機器の運転状態の監視や制御・保護定数の変更を遠距離から Web を通して行う機能を付加した製品を開発し，省力化や生産性向上に寄与している。

3. 5　鉄道車両・地上設備用変換装置

鉄道は，エネルギー効率が非常に高く，大量，高速，安全かつ経済的な輸送手段である。特に最近の環境保護やバリアフリーの気運の高まりから，省エネルギーや高効率，低環境負荷が要求され，低床型電車やリニアモータ車両など新しいタイプの鉄道が登場するなど発展を続けている。富士電機は，新幹線用・在来線用の変換装置から鉄道地上設備用の各種変換装置まで，先端的な技術を適用した各種製品を納入してきている。

富士電機は，東海道新幹線の初代営業車両の 0 系から，営業運転開始が近い東海道・山陽新幹線直通用次世代車両の N700 系に至るまで，主回路電機品を納入してきた。N700 系用の主変換装置には，高耐圧 IGBT を適用した主回路システムと 64 ビットマルチ CPU 構成の制御装置を搭載した。これにより，高性能化・高機能化・低騒音化を図り，乗り心地の向上や車内の静粛性に貢献している。また装置の軽量化を目指し，IGBT 冷却用ブロアモータをなくしたブロアレス主変換装置を東海旅客鉄道株式会社（JR 東海）と共同開発した。この主変換装置は，車両走行時の走行風を活用して IGBT などを冷却するもので，ブロア付きの装置に比べ約 12 % の軽量化を実現した。さらに軽量化・高効率化を達成するため，将来は現在の誘導機に替わって，永久磁石電動機を用いた駆動システムが実用化されると考えられる。

車内のエアコン，各種装置へ電力を供給する車両用補助電源装置は，小型化・軽量化・高効率化・省メンテナンス性へのニーズに加え，最近は静粛性や信頼性向上のための冗長性が求められている。車両には，直流車両と交流車両がある。富士電機は，直流車両用補助電源装置として，高耐圧 IGBT を用いた部品点数の削減によって軽量化と信頼性の向上を実現してきた。今後はさらに小型化・軽量化，高効率化，低騒音化を目指し，**図 9** に示す低圧の IGBT を複数個直列接続した新しい主回路方式を提供していく計画である。交流車両用としては，東日本旅客鉄道株式会社に最新の待機冗長システムを適用した E721 系用補助電源装置を納入した。従来は 1 編成に 2 台の装置を搭載して編成内での冗長化が一般的であったが，装置 2 台を搭載できるスペースのない短編成車両には，装置単体としての冗長性を向上させた待機冗長システムが適している。

鉄道車両は移動性の負荷であるため，地上設備としては電圧変動や回生電力対策が必要となってくる。き電電力の品質向上・維持を目的として，鉄道地上設備にもパワエレ

技術を用いた特色のある製品が適用されている。富士電機は，新幹線用無効電力補償装置や直流回生インバータ，変電所の出力電圧を一定に制御できるPWM変換装置などを開発・納入してきた。これら装置の容量は数MVAから数十MVAと大容量であり，高耐圧IGBTの直並列技術や高密度冷却技術により実現されている。2003年から稼動しているJR東海の沼津変電所向け自励式無効電力補償装置の例では容量が60MVAとなっている。これらの装置を用いることにより，変電所の設備容量を最大限に活用した車両の最適な運用ができている。

4　あとがき

最近は電気が他のエネルギー（例えば，燃焼）に比べて環境性に優れていることから，電気への転換が今まで以上のスピードで進んでいる。さらに制御性がよいこともあって，電力・産業・輸送・通信・家電などの各分野で応用範囲が広がっている。

パワエレ技術はこれらの分野において広く使われており，その目的が電力の発生（発電），変換，蓄積，輸送，消費の各場面で電力を最適に制御し無駄をなくすることであるとすると，省エネルギーが要求される今日，パワエレ技術の使命はますます重くなっている。今後，パワエレ技術を駆使し，常に世の中のニーズに応える製品を創出していく所存である。

参考文献

(1)　井上亮二ほか．N700系新幹線車両用主回路システム．富士時報．vol.79, no.2, 2006, p.110–117.

(2)　二宮保ほか．総論．電気学会誌．vol.125, 2005, p.752–753.

e-Front runners

＊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。