

# 富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2015  
Vol.88 No.

1

特集 パワーエレクトロニクス機器



## 特集 パワーエレクトロニクス機器

今日、パワーエレクトロニクスは、ライフラインを支える社会インフラから家電製品まで、エネルギーを“創る”“つなぐ”“使う”あらゆる場面におけるキーテクノロジーとなっています。また、メガソーラーなどの創エネルギーにおける高効率変換と、モータ駆動などの省エネルギー化により低炭素社会を実現するものとして大きく期待されています。

富士電機は、インターネット社会を支えるデータセンター向け無停電電源装置（UPS）をはじめ、各種電動力応用機器、交通・流通インフラ向けにパワーエレクトロニクス技術を駆使した製品を開発し、社会に提供してきました。

本特集では、飛躍的な高効率化や小型・軽量化を実現する SiC（炭化けい素）パワーデバイスを応用したパワーエレクトロニクス機器をはじめ、パワーエレクトロニクス技術開発における基盤技術、グローバル市場に向けた国際標準化について紹介します。

### 表紙写真（左上から右周り）

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」、690V 系列インバータ「FRENIC-VG スタックシリーズ」、SiC ハイブリッドモジュール、All-SiC モジュール、メガソーラー用 PCS「PVI1000AJ-3/1000」



# 目次

特集 パワーエレクトロニクス機器	
〔特集に寄せて〕パワーエレクトロニクス機器の特集に寄せて Johann W. Kolar	3 (3)
〔現状と展望〕パワーエレクトロニクス機器の現状と展望 友高 正嗣	7 (7)
All-SiC モジュール搭載のメガソーラー用 PCS 「PVI1000AJ-3/1000」 大島 雅文 ・ 前田 哲也 ・ 村津 宏樹	13 (13)
北米向け 3 レベル適用大容量高効率 UPS 「7000HX-T3U」 川崎 大介 ・ 濱田 一平 ・ 佐藤 篤司	18 (18)
三相 200 V 系大容量 UPS 「6000DX シリーズ」 玉井 康寛 ・ 木水 拓也 ・ 松永 和喜	22 (22)
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」 河野 博之 ・ 三垣 巧 ・ 皆見 崇之	27 (27)
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」 佐藤 和久 ・ 高野 信 ・ 野村 和貴	32 (32)
富士電機のトッランナーモータ ——「プレミアム効率モータ」の損失低減技術—— 舘 憲弘 ・ 鯉淵 博文 ・ 高橋 和利	36 (36)
インバーター体型モータ 宇津野 良 ・ 松井 康平	41 (41)
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 滝沢 将光 ・ 西嶋 与貴	46 (46)
鉄道車両用ドアの最新動向と安全・信頼性技術 梅澤 幸太郎 ・ 寺崎 富雄 ・ 稲玉 繁樹	50 (50)
北陸新幹線新黒部変電所向け電力補償装置 尾曾 弘 ・ 金子 知実 ・ 鈴木 明夫	56 (56)
港湾および造船所向け多機能陸電設備 宮下 勉 ・ 梅沢 一喜 ・ 城市 洋	62 (62)
パワーエレクトロニクス機器のシミュレーション技術 松本 寛之 ・ 玉手 道雄 ・ 吉川 功	66 (66)
パワーエレクトロニクス機器の国際標準化活動 高橋 弘 ・ 吉岡 康哉 ・ 佐藤 以久也	71 (71)
解 説	
機能安全, パワーデバイスの駆動条件, パワーデバイスの発生損失, IP, SIL, 3 レベル電力変換方式	76 (76)
新製品紹介論文	
国内向け高性能コンパクト型インバータ 「FRENIC-Ace」	79 (79)
略語・商標	82 (82)

## Contents

### Power Electronics

<b>Preface to the Special Issue on “Power Electronics”</b> Johann W. Kolar	3 (3)
<b>Power Electronics: Current Status and Future Outlook</b> TOMOTAKA, Masatsugu	7 (7)
<b>Mega Solar PCS Incorporating All-SiC Module “PVI1000 AJ-3/1000”</b> OSHIMA, Masafumi MAEDA, Tetsuya MURATSU, Hiroki	13 (13)
<b>Large-Capacity, High-Efficiency 3-Level UPS for North America “7000HX-T3U”</b> KAWASAKI, Daisuke HAMADA, Ippei SATO, Atsushi	18 (18)
<b>3-Phase 200 V Large-Capacity UPS “6000DX Series”</b> TAMAI, Yasuhiro KIMIZU, Takuya MATSUNAGA, Kazuki	22 (22)
<b>General-Purpose Inverters Meeting Global Standards, “FRENIC-HVAC/AQUA Series” and “FRENIC-Ace Series”</b> KONO, Hiroyuki MIGAKI, Takumi KAIMI, Takashi	27 (27)
<b>690-V Inverters Equipped with SiC Hybrid Module, “FRENIC-VG Stack Series”</b> SATO, Kazuhisa TAKANO, Makoto NOMURA, Kazuki	32 (32)
<b>Fuji Electric's Top Runner Motor — Loss-Reduction Technology of “Premium Efficiency Motor”</b> TACHI, Norihiro KOIBUCHI, Hirobumi TAKAHASHI, Kazutoshi	36 (36)
<b>Inverter-Integrated Motor</b> UTSUNO, Makoto MATSUI, Kohei	41 (41)
<b>Technologies to Reduce Size and Weight of Power Electronics Equipment for Rolling Stock</b> TAKIZAWA, Masamitsu NISHIJIMA, Tomotaka	46 (46)
<b>Latest Trend and Safety and Reliability Technology of Rolling Stock Doors</b> UMEZAWA, Kotaro TERASAKI, Tomio INATAMA, Shigeki	50 (50)
<b>Railway Static Power Conditioner for Shin-Kurobe Substation of Hokuriku Shinkansen</b> OSO, Hiroshi KANEKO, Tomomi SUZUKI, Akio	56 (56)
<b>Multifunctional On-Shore Power Systems for Harbors and Shipyards</b> MIYASHITA, Tsutomu UMEZAWA, Kazuyoshi JOICHI, Hiroshi	62 (62)
<b>Simulation Technology for Power Electronics Equipment</b> MATSUMOTO, Hiroyuki TAMATE, Michio YOSHIKAWA, Ko	66 (66)
<b>Standardization Activities for Power Electronics</b> TAKAHASHI, Hiroshi YOSHIOKA, Yasutoshi SATO, Ikuya	71 (71)
<b>Supplemental Explanation</b>	
<b>Functional Safety, Drive Conditions of Power Devices, Power Dissipation of Power Devices, IP, SIL, 3-Level Power Conversion</b>	76 (76)
<b>New Products</b>	
<b>High Performance Compact Inverter for Japanese Market “FRENIC-Ace”</b>	79 (79)
<b>Abbreviations and Trademarks</b>	82 (82)

特集に寄せて (5 ページに “和文翻訳” 掲載)

## Preface to the Special Issue on “Power Electronics”

Johann W. Kolar

Professor, Swiss Federal Institute of Technology Zurich  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich



Raising the efficiency of energy use and increasing the integration of renewable energy in energy production are today mandatory goals of the energy policy of leading industrial nations. In the case of electrical energy, power electronics, i.e. the electronic control of power flows and the conditioning of electrical voltages and currents by means of high switching frequency power semiconductors represents a key technology in this context. Examples are the feeding of photovoltaically generated DC energy into AC grids with simultaneous assurance of solar cell operation at the maximum power point, and the minimization of transmission losses on the connection of windparks to geographically distant load centres by means of high-voltage DC transmission. On the other hand one should mention here the possibility of avoiding inefficient industrial processes by means of a controllable voltage that is flexible with regard to amplitude and frequency which, e.g., enables high efficiency, variable speed drives to be realized with controlled torque.

Because of the abovementioned advantages, power electronics converters exhibit a considerable variety of application possibilities and over the past few decades have been significantly improved by the continuous development of power semiconductor technology, the employment of digital signal processing, new converter topologies and modulation and control schemes in respect of functionality, cost/performance ratio, physical size and efficiency. In spite of the high state of the technology thus attained, there still exists a demand for a massive further increase in performance, whereby typically not only one performance index but simultaneously several objectives need to be improved, e.g. efficiency and size or costs and efficiency.

New component technologies such as wide band-gap, i.e. SiC and GaN power semiconductors offer a technological basis for the above but because of the high switching speed, this must be complemented by new packaging technologies. Integration of the gate

driver and the power switch is obvious here and in future will also enable programming of the switching behaviour as well as local monitoring. Further enablers are new joining technologies in power semiconductor modules, such as the replacement of soldering by low temperature silver sinter processes, whereby higher operating temperatures and/or lower cooling effort become possible. With regard to passive components one should mention new ceramic capacitor technologies with high energy density and current rating, and new heat management processes such as double-sided cooling and local two-phase cooling. Finally, the technology and design space will be extended by an even broader implementation of digital technology: on the one hand in converter control, and on the other hand for identification procedures as basis for optimal on-line controller parametrization. Furthermore, in the field of power supplies a transition from hard-switching converters operated in continuous current mode is to be expected to converters with discontinuous or triangular-shaped current curves and soft switching; the higher conduction losses compared with continuous current flow are here compensated by the low on-state resistances of new power semiconductors. In order to limit the EMC filtering effort, it is then sensible to employ phase-shifted operation of several systems working in parallel, i.e. interleaving, by means of which a continuous current curve again results. The overall more complicated modulation in this case can be managed through the continuous further development of digital technology (Moore's Law) by means of signal processors or FPGAs.

Furthermore, as always with the further development of established technologies, increased integration of partial functions will take place on all levels. For example, on the converter level integration of motor and inverter is advantageous as it allows an optimal design of an overall system and an easier application for the user. Finally, the further development of simulation tools should be mentioned, which will facilitate a multi-

domain analysis of power electronics converters, e.g. the simultaneous examination of electrical and thermal or magnetic and thermal issues. The challenges here lie mainly in model generation and parametrization.

The present Special Issue of Fuji Electric Review offers for the abovementioned points many direct examples in the form of finished products, e.g. an all-SiC PV inverter of high power, optimized with respect to efficiency and costs, a hybrid Si-SiC inverter traction converter of high efficiency and power density, a variable speed drive for air conditioners with inverter integrated in the motor to reduce size and costs, a new motor series optimized for efficiency, and uninterruptible power supplies with new T-type three-level topology. The significant improvement in performance obtained with these industrial systems over the state-of-the-art impressively confirms the highly dynamic technological progress in power electronics and a comprehensive practical mastery of an extremely broad technology spectrum.

Despite of the very high technological level now attained, the improvement of the performance of power electronics will continue in future. The next development step will presumably focus on cost reduction and the assurance of high reliability and robustness. New production technologies such as the encapsulation of power semiconductors, optical signal paths and heat removal devices in printed circuit boards and 3D additive manufacturing technologies will enable new geometries or increased multifunctional uses of construction elements. The highly integrated and highly compact systems, however, will then require convergence of simulation and measurement procedures in order to simulate no longer measurable quantities on the basis of adapted models directly accompanying measurement.

With regard to the fields of application of power electronics, we can expect an expansion of the present areas to direct coupling to medium voltage with isolated medium frequency converters, e.g. for the

supply of DC distribution systems. At the same time, in the low power area, with utilizing microelectronics manufacturing technologies, a new branch of power electronics will be established that may be termed micro-power electronics. Finally, with the increasing spread of power electronics, one will need to consider during the design process not only minimal manufacturing costs but also the support of recyclability in order to enable a resource-conserving circular economy to be established. Considerations regarding materials use and costs should then also be addressed in academic research, as has been the case for several years at the Power Electronic Systems Laboratory at ETH Zurich.

In conclusion it should be highlighted that in central fields of application, a paradigm change is to be expected from the consideration of a single converter to the design of entire power supply chains. The demand for efficient power conversion at any given instant will be replaced by the demand for the assurance of an efficient and reliable energy supply with minimal overall costs over the lifetime of a power supply system. At the same time, apart from the analysis of the detailed functioning of converters, the investigation of interactions of converters, e.g. in micro and pico-grids will also gain significantly in importance. The power electronics converter will then become a standardized functional block, similar to integrated circuits in analogue and digital technology, which several decades ago arose from discrete circuits. The realization of smart grids and ultimately smart multi-energy carrier grids, which apart from electrical energy also integrate other energy carriers, will hence be supported to a significant extent. The necessary expansion of technological competence from the components to the system and in addition to other disciplines apart from power electronics, however, presents a massive challenge, but on the other hand offers fascinating possibilities for creativity, technological innovation and ultimately economic success!

特集に寄せて (3 ページに“原文”掲載)

# パワーエレクトロニクス機器の特集に寄せて

Johann W. Kolar

スイス連邦工科大学チューリッヒ校 (ETHZ) 教授

エネルギーの利用効率の向上、および再生可能エネルギーの普及と促進は、今日では主要工業国のエネルギー政策における必達目標となっている。このような状況下において電気エネルギーでは、高周波スイッチングパワー半導体による電力制御と電圧や電流の品質の調整を行う、パワーエレクトロニクス (パワエレ) 技術が重要となっている。例えば、太陽光発電では最大電力点追従により最高発電効率で直流エネルギーを交流グリッドに送ることや、風力発電では長距離送電に起因する送電ロスを高圧直流送電によって削減することが挙げられる。その一方で、出力電圧と周波数を自由に制御できるコンバータにより、高効率なトルク制御可変速ドライブが実現でき、産業プロセスを効率化できる。

以上のような利点から、パワエレ技術を使ったコンバータは非常に広い応用範囲があり、過去数十年にわたるパワー半導体技術の継続的な発展、デジタル信号処理の採用、新しいコンバータのトポロジと変調方式の採用によって、機能性、コストと性能のバランス、装置サイズと変換効率が大幅に向上してきている。このように高い性能が達成されているにもかかわらず、大幅な性能向上に対する要求が尽きることはなく、一つの性能指標のみならず、例えば変換効率とサイズ、またはコストと効率といった複数の性能指標を同時に改善する必要がある。

SiC (炭化けい素) および GaN (窒化ガリウム) のようなワイドバンドギャップパワー半導体を使った新しいデバイス技術は、先に述べたような性能を向上する上で技術的な基盤を提供するものである。同時に、スイッチング速度が速いために新しいパッケージ構造などの新技術が必要となる。さらに、ゲートドライバとパワー半導体スイッチの一体化によって、将来的には、装置のローカルモニタリングに加えて、スイッチング挙動の制御が可能となるであろう。さらなる性能向上のためのキーテクノロジーとして、はんだ接合に代わる低温銀焼結プロセスなどのパワー半導体モジュールにおける接合技術などがある。これによってより高い温度における動作や冷却構造の簡略化が可能になる。受動部品に関しては、高エネルギー密度と高電流定格

を備えた新しいセラミックコンデンサ技術と、両面冷却や気液二相冷却などに代表される新しい冷却技術について注目しておく必要がある。コンバータそのものの制御やオンラインで最適な制御パラメータを決定するための基盤技術としてのデジタル制御技術は、より大きな広がりを見せるだろう。さらに電源分野においては、電流連続モードで動作させるハードスイッチングコンバータから、電流不連続モードまたは電流臨界モードで動作させるソフトスイッチングコンバータへの移行が期待されている。電流不連続モードで問題となる高い導通損失は、次世代パワー半導体の低いオン抵抗によって改善される。EMC フィルタを設計する場合には、複数のシステムを並列に動作させる位相シフト型システム、すなわちインターリーブ型のコンバータの採用が考えられるが、これは電流連続モードで動作するため慎重な選択が必要である。これらの複雑な変調方式の採用は、DSP (Digital Signal Processor) または FPGA (Field Programmable Gate Array) などのデジタル制御装置のさらなる性能向上 (ムーアの法則) により容易になるだろう。

確立された技術のさらなる開発に伴い、機能の統合が全てのレベルで行われることになる。例えば、装置レベルの統合においては、モータにインバータを統合することにより装置全体の最適設計を可能にするのみならず、ユーザの利便性を向上することができる。最後に付け加えたいのは、装置特性の多面的な解析を容易とするための、電気-熱特性や磁気-熱特性を同時に解析可能なシミュレーションツールの開発の重要性である。ここでの課題は、主に部品のモデル化と正しいパラメータの抽出にある。

本特集号では、上述のコンバータの性能向上に関して多くの適用事例を紹介している。例えば、効率とコストに関して最適化された高出力の All-SiC モジュールを搭載した太陽光発電向けパワーコンディショナ (PCS)、高効率で高密度の Si-SiC ハイブリッドモジュールを搭載したインバータ、サイズとコストを抑えるためのモータに一体化されたインバータ付きエアコン用可変速ドライブ、効率について最適化されたモータの新シリーズ、RB-IGBT を適用

した T- タイプの 3 レベルトポロジーを採用した無停電電源装置 (UPS) などがある。これらの最先端の産業システムにおける性能の大幅な向上は、パワエレにおけるダイナミックかつ高度な技術的進歩、ならびに極めて広範囲な技術要素の獲得が総合的かつ実践的に達成されたことを深く印象づけるものである。

既に非常に高い技術的レベルに到達しているパワエレ分野だが、今後も性能は継続して改善されるであろう。次の開発ステップとしては、おそらくコスト低減、高信頼性とロバスト性の確保に焦点が当てられることになる。プリント基板へのパワー半導体、光信号経路、放熱デバイスのパッケージ化技術や、3D プリントなどの新しい生産技術が、コンバータを構成する要素や素材を多機能化し、性能向上に貢献するだろう。ただし、高度に集積化された非常にコンパクトなシステムでは、直接測定できない信号を観測するために、シミュレーション技術と測定技術が統合された、動的な信号推定技術が必要となるだろう。

パワエレの応用分野に関しては、例えば直流給電システムに代表される中圧絶縁型コンバータのさらなる発展が期待できる。同時に、低容量領域では、マイクロエレクトロニクス技術を活用して、名付けるなら、マイクロパワーエレクトロニクスと呼ばれる新しいパワエレの分野が確立されるだろう。さらに、パワエレ機器のさらなる普及に伴い、循環型社会実現へ貢献するために、設計プロセスにおいて製造コストの削減のみならずリサイクル性まで考慮する必要が出てくるだろう。これら使用材料のコストや特性に関する研究は、大学においても研究すべきものであり、実際、スイス連邦工科大学チューリッヒ校 (ETHZ) のパワーエレクトロニック・システムズ・ラボラトリー (PES) では数年間研究を行ってきた。

結論として、これからの応用分野の中心として期待されるのは、単一のコンバータのみを考慮した設計から給配電系統全体を考慮した設計へのパラダイムシフトである。いついかなる時でも効率的に電力変換を行うという要求は、電源システムのライフサイクルコストが最小で、効率的かつ信頼性の高いエネルギー供給を保證するという要求に

置換えられることになる。それと同時に、単一のコンバータの詳細な機能の分析とは別に、例えばマイクロおよびピコグリッドシステム内のコンバータ同士の相互作用に関する研究の重要性も大きく増すであろう。数十年前にディスクリート部品で構成されていた電子回路が集積化され単一パッケージの IC・LSI へと変化したように、今後はパワエレにおけるコンバータも標準化された機能ブロックへの集積化・パッケージ化が進むだろう。スマートグリッドや、電気のみならず複数のエネルギー媒体を用いる超スマートグリッドは、これら次世代のパワエレ技術によって強力にサポートされるだろう。部品からシステムへの、またパワエレから他分野への技術的拡大の実現には多くの難題が存在する。一方でそれらは、創造性を高め、技術革新を起こし、そして最終的には経済的成功を収めるための魅力ある挑戦である！

(社内にて翻訳)

# 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

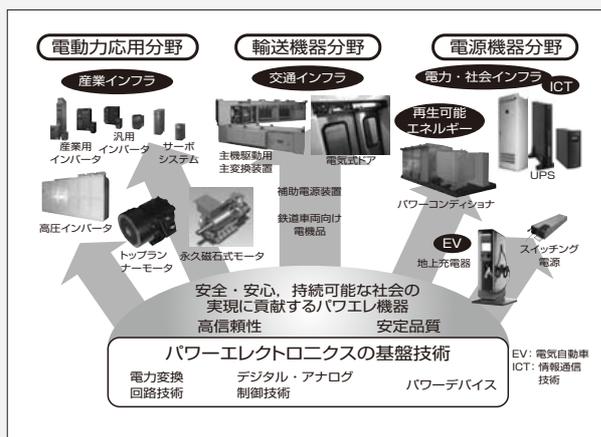


図1 富士電機のパワーエレクトロニクス機器とその応用分野

### (\*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<sup>(\*)2</sup>）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<sup>(\*)3</sup>）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<sup>(\*)1</sup>）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<sup>(\*)4</sup>）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ー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

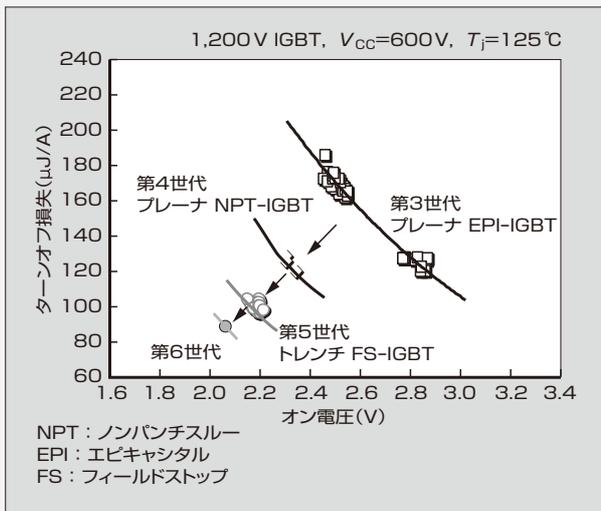


図2 Si-IGBTの世代と特性の変遷

#### (\*)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) 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)。その他、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<sup>(\*)</sup>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<sup>(\*)</sup>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<sup>(4)</sup>（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ー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<sup>(\*)</sup>（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<sup>(\*)</sup>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 「PVI1000 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。



# All-SiC モジュール搭載のメガソーラー用 PCS 「PVI1000AJ-3/1000」

Mega Solar PCS Incorporating All-SiC Module “PVI1000 AJ-3/1000”

大島 雅文 OSHIMA, Masafumi

前田 哲也 MAEDA, Tetsuya

村津 宏樹 MURATSU, Hiroki

近年、太陽光発電に対して、より高い発電性能が求められている。その中心となるパワーコンディショナ（PCS）には、高効率をはじめ、継続して発電する信頼性、トータルコストの低減などが必要である。富士電機は、次世代半導体デバイスである SiC（炭化けい素）-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）から成る All-SiC モジュールを搭載することにより、高効率なメガソーラー用 PCS を開発した。

In recent years, solar power generation has come to need greater power generation performance. Power conditioning sub-systems (PCSs) are the core of the generation, and they require high efficiency, reliability to continue to generate electricity, and a reduction of total cost. Fuji Electric has developed a highly efficient PCS for mega-solar plants by incorporating an All-SiC module consisting of silicon carbide metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (SiC-MOSFETs) and SiC Schottky barrier diodes (SiC-SBDs), which are the next-generation semiconductors.

## ① まえがき

世界的にエネルギー需要は増大の一途をたどり、CO<sub>2</sub> による地球温暖化が大きな問題となっており、太陽電池をはじめとした再生可能エネルギーの利用拡大が進められている。国内では 2012 年に施行された「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」<sup>〔注 1〕</sup>によって、事業用の太陽光発電所、いわゆるメガソーラー<sup>〔注 1〕</sup>が建設ラッシュとなっている。電力機器の価格低下と高効率化のためパワーコンディショナ（PCS：Power Conditioning Sub-system）の大容量化が進んでいる。

家庭用 PCS や従来の小・中規模 PCS では、太陽電池の電圧変動を補正するため、Si（シリコン）-IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を搭載した昇圧回路と、昇圧された直流電圧を交流に変換するインバータ回路で構成されており、電力変換を 2 回行っている。太陽電池は、太陽光パネルの表面温度が低い冬期は出力電圧が高く、表面温度が高い夏期は出力電圧が低下するので、昇圧回路を使って出力電圧を一定にしている。

一方、メガソーラー用 PCS では、電力変換を 2 回行うことによる損失の増大を避けるため、昇圧回路を使用せずに、太陽電池の出力電圧の下限付近で PCS の発電効率が最大となるように装置の仕様を設定するのが一般的である。そのため、太陽電池の出力電圧が高い秋から春にかけては、インバータの効率が低下し不経済な使用状態となっていた。

そこで、直流の昇圧回路に All-SiC モジュールを使用し、直流-交流変換を行うインバータに RB（Reverse-Blocking）-IGBT の 3 レベル電力変換回路を使用した。こ

〔注 1〕メガソーラー：設備認定されている発電規模が 1 MW を超える大規模発電所



図 1 「PVI1000AJ-3/1000」

の PCS により、太陽電池の電圧変動を高効率で補正しながら、年間を通じてインバータ効率の高い状態で運転することができる。All-SiC モジュールは、富士電機と独立行政法人 産業技術総合研究所が共同で開発した次世代半導体の SiC（炭化けい素）-SBD（Schottky Barrier Diode）と SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）を用いたものである。本稿では、この All-SiC モジュールを搭載したメガソーラー用 PCS 「PVI1000 AJ-3/1000」（図 1）の特徴について述べる。

## ② PCS における課題

これまででは、太陽光パネルの総出力電力と PCS が発電できる電力量を同程度に設計して、発電所を設置することが多かった。しかし、日本をはじめ各国の再生可能エネル

ギーの電力買取制度によって太陽光パネルの低コスト化が進むにつれ、設備利用率を上げる方法として、太陽光パネルの並列数を増やして PCS の発電能力の 1.2 ～ 1.4 倍程度の発電量とする発電所が増えている。このような発電所では、太陽光パネルは最適動作点よりも電流は低く電圧は高い状態での発電が多くなる。そのため、最適動作点よりも高い電圧で高効率な電力変換が PCS に求められる。

一般に、PCS は太陽光パネルの出力特性に応じて最適動作点で発電するように直流電圧と電流を制御するという最大電力点追従制御 (MPPT 制御) を行い、系統へ電力を供給している。太陽光パネルと PCS の発電能力が同等の場合、昼の一番強い日射のときに最大発電電力となる。一方、太陽光パネルの並列数を増やす (積み増し) ことにより発電能力を PCS の最大発電量よりも高めた場合の太陽光パネルの積み増しと出力特性を図 2 に示す。この場合には、昼の日射が最大となる時点よりも早い時間に最大発電電力に達する (図 2 (a))。太陽光パネルをより多く積み増して、最大発電が可能な時間帯をより長くすることで一日の発電量を上げることができる。早朝の発電を開始する前の太陽光パネルは開放電圧  $V_{oc}$  の状態であり、MPPT 制御によって  $V_{oc}$  から太陽光パネルの最適動作電圧  $V_{pm}$  へ向かって動作するため、太陽光パネルは常に最適動作点より高い状態での動作となる。(図 2 (b))。

変換器の損失には、導通損失とスイッチング損失の二つがある。インバータ回路はインバータの直流中間電圧が高

いほどスイッチング損失が増加する。インバータの出力電圧と電流が同じであれば導通損失は変わらないため、直流中間電圧が高くなるにつれてスイッチング損失は増え、変換効率が低下する。これまでのメガソーラー用 PCS は、太陽光パネルの出力を直接インバータ回路の直流中間へ接続していることが多く、太陽光パネルを積み増すと太陽光パネルの最適動作点より高い電圧で発電する機会が多くなること、昼間の気温がそれほど高くない秋から冬、春にかけて太陽光パネルの電圧は開放電圧、最適動作電圧含めて高くなることから、インバータのみの変換では効率が低下するという問題があった。

### ③ 「PVI1000AJ-3/1000」の特徴

②章で述べた課題を含め、発電事業に大きな損失をもたらすことなく、継続して発電し続けるという高い信頼性が PCS に求められる。したがって、PCS には次の 3 点が必要である。

- (a) 高効率 (最適動作点以上において)
- (b) トータルコストが低いこと
- (c) 信頼性 (発電継続性) が高いこと

PVI1000AJ-3/1000 は、これらを実現するメガソーラー用 PCS である。

#### 3.1 高効率

今回、太陽光パネルの積み増しに対して装置効率を上げるために、昇圧回路を採用した。昇圧回路は、負荷量が変わらなければ、昇圧回路の直流入力電圧が低いときは、導通損失、スイッチング損失とも発生するが、電圧が上がるにつれて電流が減少するので、導通損失、スイッチング損失とも減少していく。この損失特性と昇圧された状態におけるインバータ部の効率の関係を最適化することで、装置の効率は直流入力電圧が上がるほど高効率になる特性にすることができる。昇圧回路の直流入力電圧は太陽光パネルの出力電圧に相当するので、積み増しや季節変動に対してこの特性を適用できる。

本製品は、昇圧回路に All-SiC モジュール (図 3) を搭載することでチョッパ部を高効率化し、インバータ部の

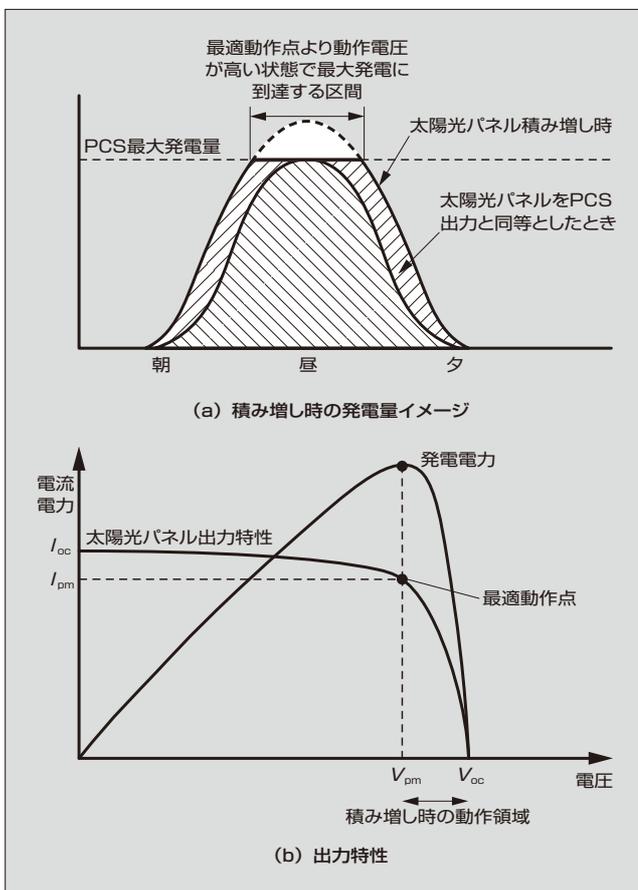


図 2 太陽光パネルの積み増しと出力特性

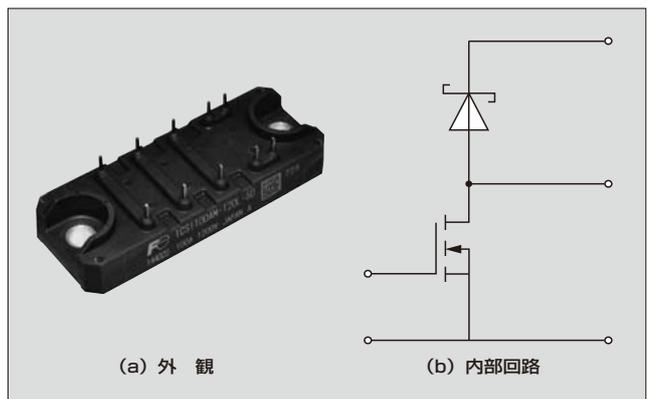


図 3 All-SiC モジュール

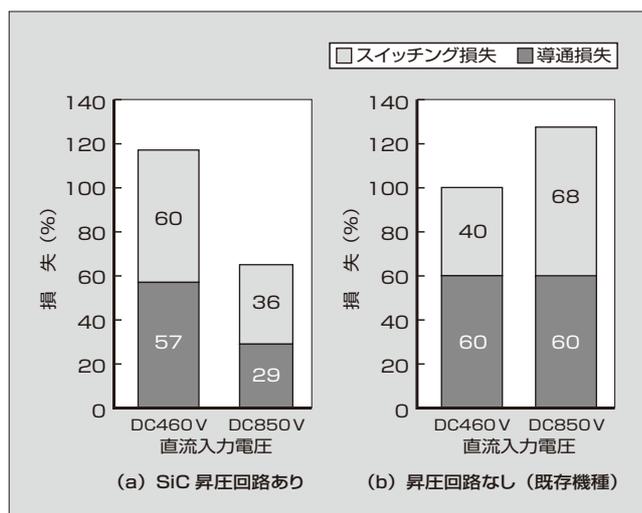


図4 PCSの損失比較

Tタイプ3レベル電力変換回路にAT-NPC (Advanced T-type Neutral-Point-Clamped) 3レベルIGBTを採用した。

図4に、昇圧回路がない場合のPCS (既存機種) とSiC昇圧回路がある場合のPCSについて損失の比較を示す。既存機種の直流入力電圧460Vにおける導通損失とスイッチング損失の合計を100%とすると、直流入力電圧が850Vに上がると導通損失は変化しないが、スイッチング損失が40%から68%に増加し、損失は約128%になった。今回開発したSiC昇圧回路を付与したPCSでは、直流入力電圧が460Vのときは、昇圧回路がないPCSに比べ17ポイントほど損失が増えているものの、直流入力電圧が850Vのときには損失が35ポイント改善している。

その結果、装置の最大効率を98.8% (IEC 61683 効率裕度表示, 内部電源含まず) とすることができた。

### 3.2 トータルコストの低減

従来のメガソーラー用のPCSは、太陽光パネルの直流電圧とインバータ回路の直流中間部を直接接続する方式が多く、太陽光パネルの電圧が変動するとインバータ回路の直流中間電圧も変動する。一方、太陽光パネルの電圧は、開放電圧と最適動作電圧の間で変動するため、冬期の気温が低いときは開放電圧が高くなり、夏期の気温が高いときは最適動作電圧が低くなる。そのため、インバータ回路は、最適動作電圧が低いときでも、開放電圧が高いときでも動作する必要がある。

例えば、インバータの直流中間電圧 (太陽光パネルの夏期の最適動作点) が340V程度の場合、交流電圧200V (282Vピーク) までしか出力できない。インバータ回路の出力電力は、インバータの交流出力電圧と電流で決まるが、インバータの直流中間電圧を340Vから800V程度まで高くできれば、これまでと同じインバータ回路で、交流出力電圧を400Vまで上げて出力電力を2倍にすることができる。

そこで、昇圧回路によってインバータ回路の直流中間電

圧を上げ、インバータの出力電圧、出力電力を大きくしてインバータ回路の利用効率を改善した。さらに、出力を1MWと大容量化することで、メガソーラーでのPCSの使用台数や、高圧連系を行う機器類の使用数を削減できるようになりトータルコストが低減する。

### 3.3 高信頼性

チョップパ主回路部は、1台当たり83kW出力のユニットを12台用いて構成している。いずれのユニットが故障しても、故障したユニットを自動で停止し、運転を継続することができる。この機能により装置全体の停止を避けることができ、発電継続性が向上した。故障したユニットは、監視モニタや本体の表示画面にて特定することができるとともに、プラグイン方式なので簡単に交換することができ、迅速な復旧が行える。なお、ヒューズ溶断などの重故障が発生した場合は、手動により故障ユニットを除いたあとに、縮退運転で運転を継続できる。

### 3.4 発電電力の向上

#### (1) MPPT制御の2系統化

これまでのメガソーラー用PCSは、複数の直流入力に対してMPPT制御を一括で行っていた。本製品は、4入力のうち2入力ごと (500kW単位) に、チョップパ回路部で個別にMPPT制御を行い、発電量の向上を図っている。

#### (2) 出力力率0.9~1.0の定格出力電力

太陽光発電を含めた再生可能エネルギーによる発電の増加は系統電圧が変動する原因となるので、系統を適正に維持する手段が必要である。特に太陽光発電は、電力消費地域から遠方に設置されることが多く、系統へ送電する電力が、消費される電力より大きくなると系統の電圧を上昇させてしまう。そこで、電力会社は、配電系統の電圧上昇を抑制するため、PCSから無効電力を系統に注入することで電圧抑制を図るように推奨している。例えば、これまでの富士電機のPCS (1,000kVA, 1,000kW) の場合、力率を0.9にすると1,000kVA, 900kWとなり定格の1,000kWが出力できなかった。本製品では、出力力率が0.9~1.0の範囲で定格出力電力を発電できるように出力定格を1,111kVA, 1,000kWとすることで、発電電力量を低下させずに配電系統の電圧上昇を抑制できる。

### 3.5 屋内型構造と装置の小型化

#### (1) 屋内型構造

本製品は屋外へ設置するときは、コンテナに搭載して使用する屋内型構造とし、屋外型PCS「PVI1000」では対応できなかった沿岸地域 (塩害地域) に対しては、コンテナの仕様を変更することで設置できるようにした。

#### (2) 装置の小型化

チョップパ部をユニット構造とし、インバータ回路を最適化することで、外形は従来機種の「PVI750-3/500-T」 (500kW出力PCS) を2台設置した場合と比較して約60%の小型化 (フットプリント) を実現した。チョップパ

ユニットはそれぞれインターリーブ制御が行われており、主回路の小型化と、スイッチング損失のバランスを考慮してスイッチング周波数を 20 kHz としている。これらによりスイッチングリップルを低減し、フィルタを縮小することでチョッパユニットを小型化している。

表1 「PVI1000AJ-3/1000」の仕様

項目	仕様
出力容量	1,111 kVA/1,000 kW
直流電圧範囲	450 ~ 1,000 V
MPPT範囲	460 ~ 850 V
最大入力電流	2,440 A
交流電圧	480 V (±10%)
周波数	50/60 Hz
力率	0.9 ~ 1.0 (定格出力) 0.8 ~ 0.9 (出力低減)
高調波ひずみ率	5%
最高効率	98.8%
EURO効率	98.5%
外形	W2,980×D900×H1,950 (mm)
質量	2,850 kg

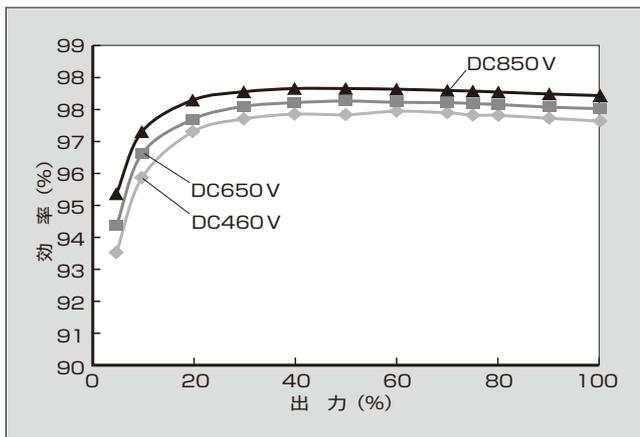


図5 効率カーブ

### 3.6 仕様

表1に、PVI1000AJ-3/1000の仕様を示す。直流電圧範囲は、DC1,000Vに対応し、定格出力における最大電力点追従範囲は460～850Vである。交流出力電圧は480Vであり、連系トランスにより各サイトにおける系統電圧に昇圧する。最高効率である98.8%およびEURO効率（EU圏で規定されている、より実運用に近い効率）98.5%は、直流電圧が850Vのときの値である。図5に出力電力と効率の関係を示す。入力電圧が高くなるにつれて効率がよく

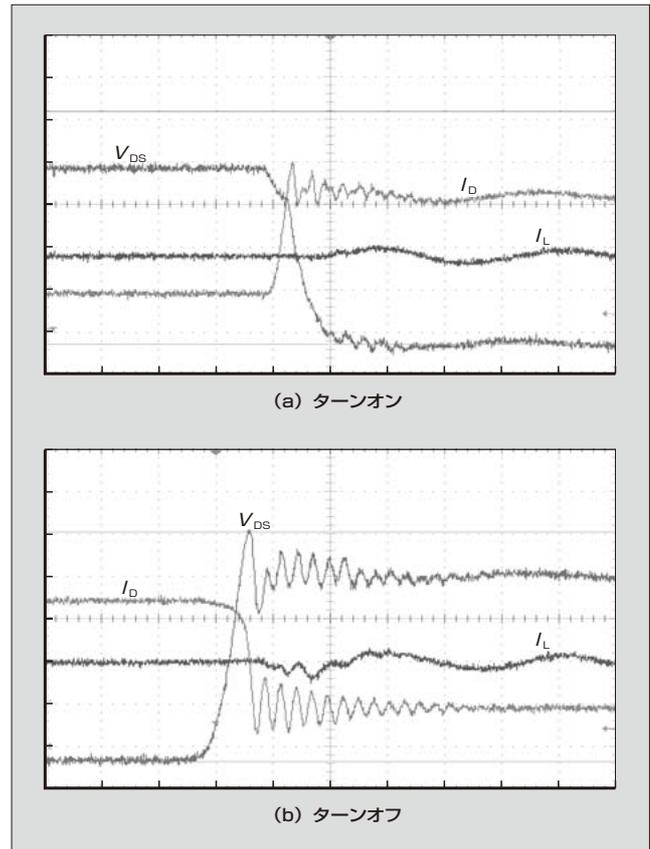


図7 SiC-MOSFETのスイッチング波形

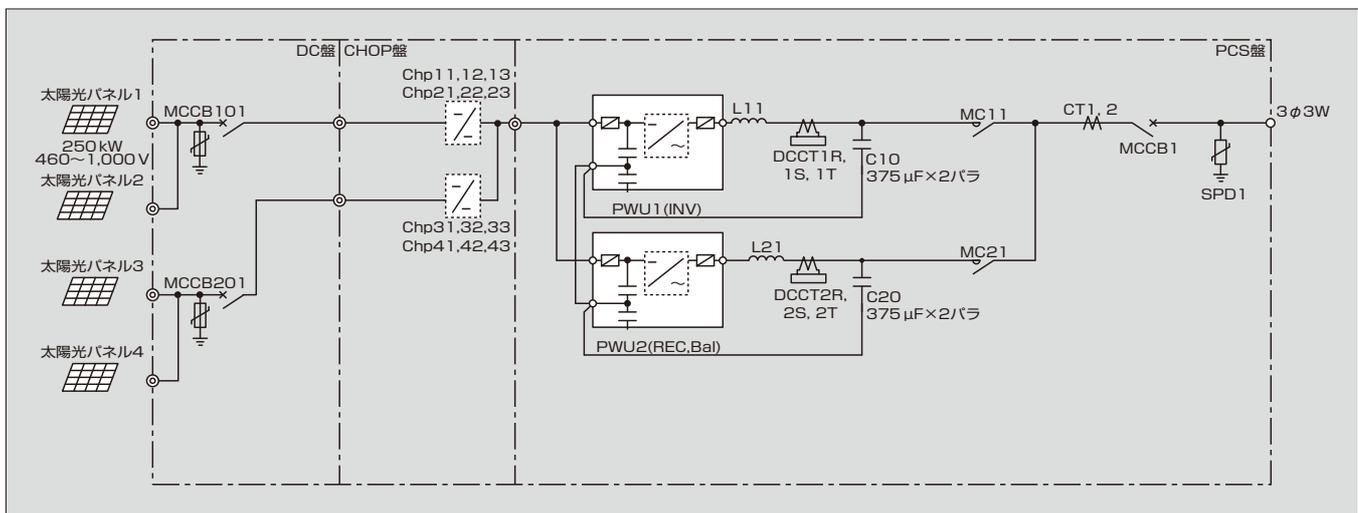


図6 「PVI1000AJ-3/1000」の回路構成

なっている。

### 3.7 回路構成

図 6 に、PVI1000 AJ-3/1000 の回路構成を示す。83kW のチョップユニット 12 台と、500kW のインバータユニット 2 台から成る。図に示したものでは直流入力は 4 回路であるが、オプションの直流入力盤により最大 24 回路まで増やすことができる。

### 3.8 低インダクタンス化

All-SiC モジュールは、チップと端子間のボンディングワイヤをなくしている<sup>(9)</sup>ので、インダクタンスが従来のモジュールよりも低い。さらに、主回路端子をプリント基板で構成することで、ねじ端子で接続する方法よりインダクタンスは低い。これにより、従来のモジュールに比べてスイッチング速度が速くなっているが、ターンオフ時の跳ね上がり電圧を抑制している。直流電圧 850V、スイッチング電流 100A における SiC-MOSFET のスイッチング波形を図 7 に示す。ターンオフの時間は、低インダクタンス化により Si-IGBT の 10% 以下の 100ns 以内であり、跳ね上がり電圧は Si 並みのレベルである。

## 4 あとがき

「PVI1000 AJ-3/1000」<sup>(注2)</sup>は、メガソーラー用 PCS として初めて All-SiC モジュールを採用し、高効率発電を実現した。これに加え、単機大容量によるシステムコストの低減やコンテナ収納による耐設置環境の向上により、メガソー

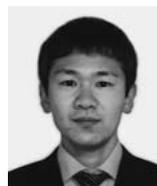
〈注2〉「PVI1000 AJ-3/1000」：一般社団法人 日本電機工業会「平成 27 年度（第 64 回）電機工業技術功績者表彰」対象

ラーに最適な PCS である。

今後も、さらなる高効率化と大容量化を推進し、低炭素社会の実現に貢献していく所存である。

### 参考文献

- (1) 藤井幹介ほか. メガソーラー向け屋外設置型高効率PCS「PVI1000」. 富士時報. 2012, vol.85, no.3, p.245-249.
- (2) 松本康ほか. SiCデバイス搭載のパワーエレクトロニクス機器. 富士時報. 2012, vol.85, no.3, p.255-259.
- (3) Hinata, Y. et al. "Full SiC Power Module with Advanced Structure and its Solar Inverter Application", Conference Proceeding on Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013.



#### 大島 雅文

パワーコンディショナ、無停電電源装置の開発・設計に従事。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開発部課長補佐。パワーエレクトロニクス学会会員。



#### 前田 哲也

パワーコンディショナ、無停電電源装置の開発・設計に従事。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開発部。



#### 村津 宏樹

パワーコンディショナ、無停電電源装置の開発・設計に従事。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開発部。パワーエレクトロニクス学会会員。



# 北米向け 3 レベル適用大容量高効率 UPS 「7000HX-T3U」

Large-Capacity, High-Efficiency 3-Level UPS for North America “7000HX-T3U”

川崎 大介 KAWASAKI, Daisuke

濱田 一平 HAMADA, Ippei

佐藤 篤司 SATO, Atsushi

近年、情報化社会における情報通信システムの発展により、データセンター市場は国内外で伸長している。これに伴い、システムを安定に稼働させる無停電電源装置（UPS）へのニーズも伸長している。北米市場向けに、定格電圧 480 V で 3 レベル電力変換回路による大容量で高効率な UPS 「7000HX-T3U」を開発した。富士電機独自の AT-NPC3 レベル IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュールを使用することで、最高効率 97% 以上の高効率を達成した。さらに、従来機種と同様に高信頼性を実現しつつ、北米で求められる UL 規格や NEC 規格に対応した。

Due to the development of information and communications systems in the information society in recent years, the data center market is expanding both in Japan and abroad. At the same time, there are increasing needs for uninterruptible power systems (UPSs) to ensure stable system operation. “7000HX-T3U,” which has been developed for the North American market, is a large-capacity, high-efficiency UPS using a 3-level power conversion circuit with a rated voltage of 480 V. By using Fuji Electric’s original AT-NPC 3-level insulated gate bipolar transistor (IGBT) module, the UPS has achieved a maximum efficiency of as high as 97%. It provides high reliability, as with the conventional models, and also supports UL and NEC standards which must be complied with in North America.

## ① まえがき

通信機器・ネットワークなどの情報通信システムは、昨今の情報化社会では必要不可欠となっている。これらのシステムが停止すると、社会活動へ甚大な悪影響を及ぼす可能性があるため、安定稼働が強く求められている。

情報通信システムの主要な役割を担う無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）は、データセンターにおいて、24 時間 365 日安定した電源を供給するための必要不可欠な電気機器である。近年のデータセンター市場の規模や成長率は、日本国内は比較的小さいが、アジアや北米においては市場規模が大きく、今後も大きな伸長が期待されている。富士電機では、日本国内・アジア向けだけでなく北米向けに UPS を展開することにした。

本稿では、北米向けに開発した定格電圧 480 V の大容量で高効率な UPS 「7000HX-T3U」（図 1）について述べる。



図 1 「7000HX-T3U」（400V 系 500kVA 機）

## ② 特徴

### 2.1 北米規格適合

北米への展開に当たり、アメリカ保険業者安全試験所の製品安全規格（UL 規格）、および米国防火委員会のケーブル敷設に関する規格（NEC 規格）への適合は必要不可欠である。本機種では、これらの規格に適合させるために、新たな装置部品の選定と開発を行った。

### 2.2 高効率

本機種は、日本国内向けの従来機「7000HX-T3」と同様に、世界最高水準の効率 97% を維持している。高い装置効率により、UPS での電力損失を低減させるだけでなく、UPS を冷却するための空調機の消費電力も削減できる。

また、データセンターでは装置の二重化や冗長化を施してシステムの信頼性を向上させているため、通常低い負荷率で運転している。通常運転時の低い負荷領域（20～50%）での電力損失も低減している。

### 2.3 高信頼性

データセンターでは 24 時間 365 日、UPS での給電を継続する必要がある。本機種は、保守メンテナンス時や万が一の故障時においても給電を継続する並列冗長運転方式や待機冗長運転方式などに対応している。図 2 および図 3 に、それぞれの代表的なシステム構成を示す。

### 2.4 高性能・高機能

#### (1) 高力率負荷対応

近年では、国際エネルギースタープログラム<sup>(注1)</sup>などにより高力率化が要求され、力率改善を行う PFC 回路を適用した電子機器が増えている。そのため、PFC 回路を適用

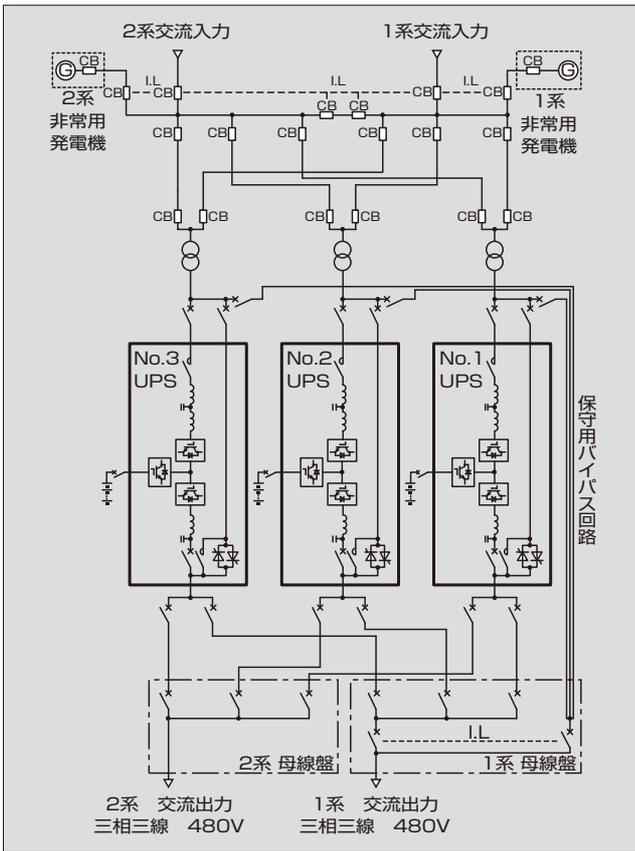


図2 並列冗長運転方式のシステム構成 (完全独立二重母線方式)

している負荷に対し、装置容量を低減することなく電力を供給するため、負荷力率 1.0 (500kW) の負荷に対応している。

(2) パワーウォークイン機能

パワーウォークイン機能は、UPS がバッテリー給電 (停電運転) から非常用発電機給電に切り替える際に、供給電力をバッテリー放電電力から徐々に非常用発電機電力へ移行するものである。この機能を設けることにより、非常用発電機に対する負荷が急変することによる非常用発電機の電圧の変動を抑制したり、乱調を防止したりできる。

(3) Web/SNMP カード

Web/SNMP カードを搭載してネットワークに接続することにより、標準ブラウザ上で UPS の運転状態を監視でき、故障情報をメールで通知する機能を備えている。

また、専用監視ソフトウェアにより、出力電力トレンド、UPS 動作履歴、故障履歴などを監視することもできる。

(4) MODBUS カード

新たに開発した MODBUS 対応のオプションカードにより、顧客設備のネットワークに接続することで UPS のデータを容易に監視することができる。Web/SNMP カ

〈注 1〉 国際エネルギー省プログラム (エナジースター) : 電気機器の省エネルギーのための国際的な環境ラベリング制度である。経済産業省と米国環境保護局の相互承認の下で運営されている。対象となる製品は家電製品から産業機械、コンピュータまで幅広い。

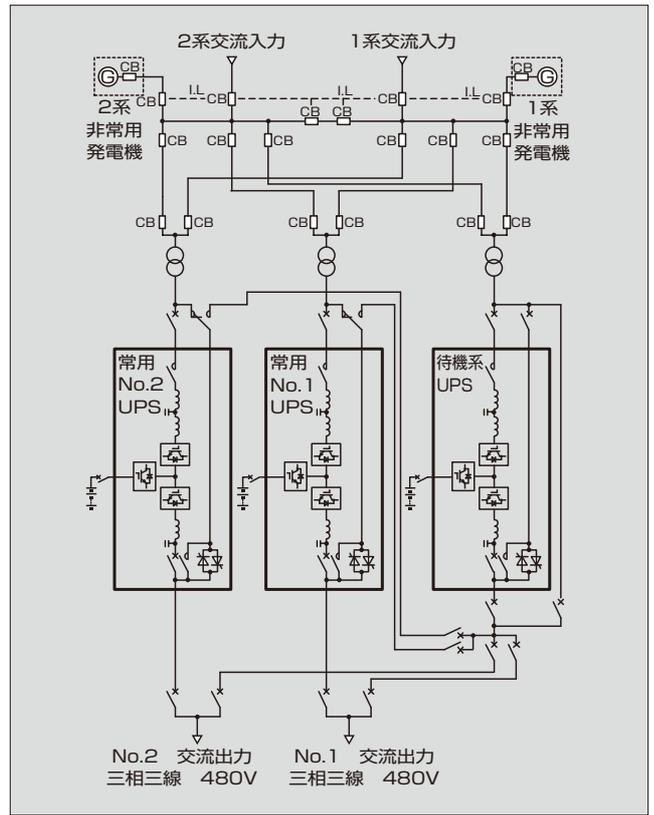


図3 待機冗長運転方式のシステム構成

ドかどちらかを選択することにより、顧客設備の通信方式に幅広く対応できる。

③ 仕様

図 4 に 7000HX-T3U の外形図を、表 1 に仕様を示す。3 レベル電力変換回路を採用することで損失が低減し、フィルタ回路を小型化した。これにより、装置の小型・軽量化を実現した。

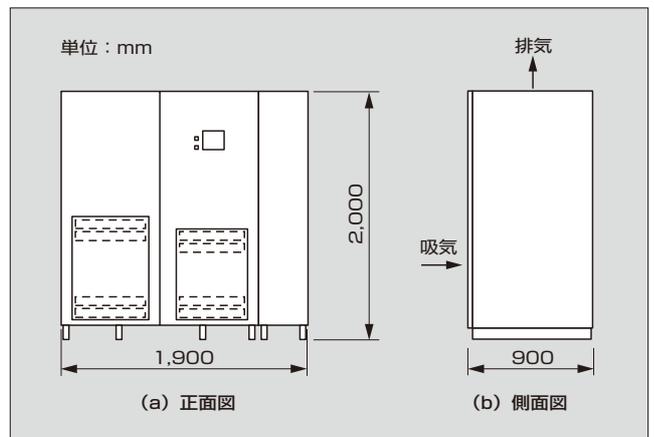


図4 「7000HX-T3U」の外形図

〈注 2〉 MODBUS : フランス Schneider Automation, Inc. の商標または登録商標

表 1 「7000HX-T3U」の仕様

項目		仕様
UPS方式		常時インバータ給電方式
定格出力容量		500kVA/500kW
装置最大効率		97%
停電切替時間		無瞬断
質量		1,800kg
交流入力	相数	三相三線
	電圧	480V+10%, -20%
	周波数	60Hz±5%
	力率	0.99(遅れ)~1.0
	電流高調波ひずみ率	3%以下
バイパス入力	相数	三相三線
	電圧	480V±10%
直流入力	公称電圧	480~528V (鉛蓄電池240~264セル相当)
交流出力	相数	三相三線
	電圧	480V
	周波数	60Hz
	負荷力率	1.0
	電圧精度(整定時)	±1%以内
	過渡電圧変動	±3%以下(負荷0⇔100%)
	整定時間	50ms以下
	電圧波形ひずみ率	2%以下(線形負荷) 5%以下(非線形負荷)
	周波数精度	±0.01%以内(内部発振時)
	外部同期範囲	±5%以下
過負荷耐量	125% 10min 150% 1min	

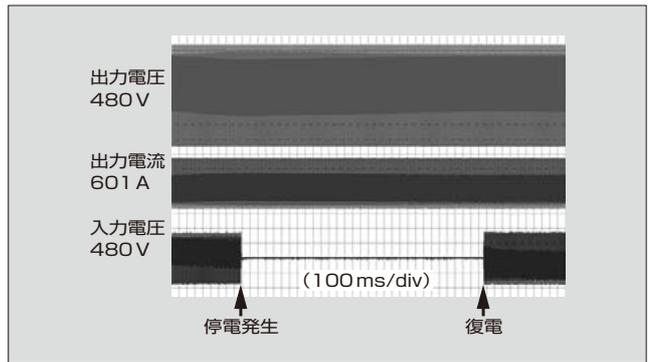


図 6 停電・復電時の波形

る。整流器はUPSの交流入力電流が力率 $\approx 1$ の正弦波となるように制御を行い、チョッパは蓄電池の充電を行う。交流入力が停電すると、チョッパは蓄電池の電圧を適正な直流電圧に昇圧し、インバータが安定した交流に変換して供給する。図6に停電・復電時の波形を示す。停電が発生しても、出力は連続して安定した電圧を供給している。

チョッパについては、前述の動作のほかに、過負荷時、入力電圧低下時、復電パワーウォークイン時といった、負荷給電を入力とバッテリーの両方から同時に行うモードでの放電制御動作も行っている。

#### 4.2 AT-NPC3 レベル電力変換回路の適用

整流器およびインバータには、図7に示すようなAT-NPC(Advanced T-type Neutral-Point-Clamped)3レベル電力変換回路を採用している。この変換回路に使用する半導体素子は、富士電機が開発したAT-NPC3レベルIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールを使用している。

AT-NPC3レベル電力変換回路の特徴を次に示す。

- (a) スwitching電圧が2レベル電力変換回路の場合の半分になるので、変換器のSwitching損失が低減し、電力変換効率の向上、省エネルギー化、変換器の小型化が可能である。

#### 4 回路構成と動作

##### 4.1 主回路構成と動作の概要

図5に主回路ブロック図を示す。交流を直流に変換する整流器と、直流を交流に変換するインバータからなるダブルコンバージョン方式を採用している。さらに、直流入力には蓄電池の充放電制御を行うチョッパを接続する。

交流入力が正常範囲にある通常運転状態では、インバータによって定電圧定周波数の安定した電力を負荷に供給す

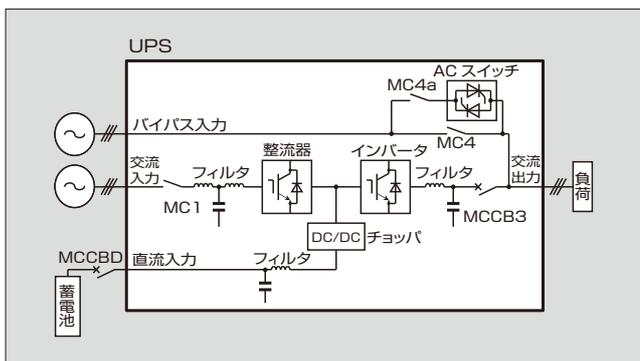


図 5 主回路ブロック図

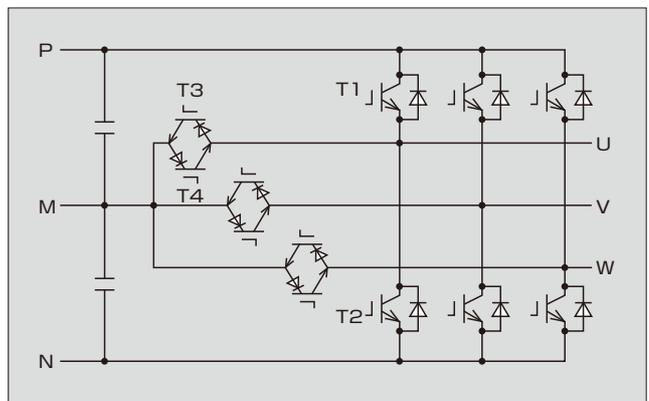


図 7 AT-NPC3 レベル電力変換回路

〈注3〉3レベル電力変換回路：78ページ「解説6」“3レベル電力変換方式”を参照。

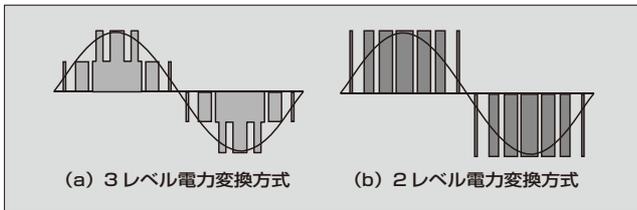


図 8 スイッチング波形の比較

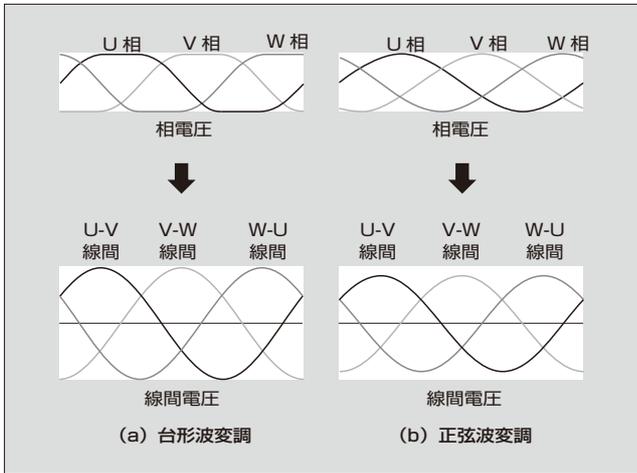


図 9 整流器とインバータの電圧波形

- (b) スイッチング波形が図 8 のように階段状になるので、2 レベル電力変換回路に比べて高調波電圧が低減される。これにより、フィルタ回路の高調波による損失が低減するので、固定損（無負荷損）が低減され、低負荷領域での効率が向上するほか、リアクトルやコンデンサの小型化も可能となる。
- (c) スイッチングに伴う発生ノイズが、2 レベル電力変換回路よりも低減できる。

### 4.3 交流定格 480V 対応

本機種の定格電圧は線間 480V であるため、変換器は日本国内向けに一般的な 415V に比べて高い電圧を出力しなければならない。そのために、一般的には半導体電力変換器に使用する素子の耐圧を高いものに変更する必要があるが、本機種では制御方式として台形波変調方式を採用することにより日本国内向け製品と同一の素子が使えるようにした（図 9）。

台形波変調では、相電圧のピークが正弦波と同一であっても、正弦波変調よりも高い線間電圧を出力することができる。半導体素子の耐圧は相電圧によって決まるため、台形波変調を用いることで、耐圧の低い素子でも高い線間電圧を得ることができる。また、直流電圧が低くて済むので、半導体のスイッチング損失も低減できる。

### 4.4 効率と損失

図 10 に、本機種の AC-AC 運転における効率特性を示

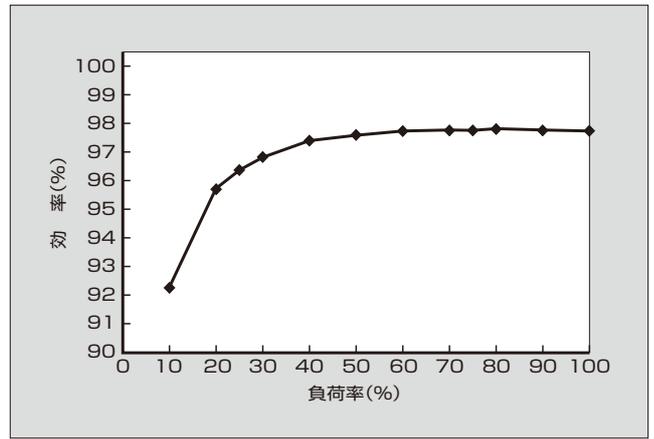


図 10 AC-AC 運転における効率特性

す。負荷率が 20～100% の間で、最高効率は 97% 以上、最低効率は 95% 以上である。すなわち、実運用負荷が低い場合も効率が良いので、高い省エネルギー効果が得られる。

## 5 あとがき

北米向け AT-NPC3 レベル適用大容量高効率 UPS 「7000HX-T3U」について述べた。北米規格や各種電源システムに対応しており、安全、低環境負荷と高信頼が要求される電源設備への広い適用が期待できる。

今後も電源装置の省エネルギー化とグローバル化を推進し、お客様の期待に応えていく所存である。

### 参考文献

(1) 中澤治雄ほか. アドバンストNPC変換器用RB-IGBT. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.304-307.



#### 川崎 大介

中大容量 UPS の開発・設計に従事。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開発部。



#### 濱田 一平

中大容量 UPS の開発・設計に従事。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開発部。電気学会会員。



#### 佐藤 篤司

中大容量 UPS の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パワーサプライ事業部企画部。

# 三相 200V 系大容量 UPS 「6000DX シリーズ」

3-Phase 200 V Large-Capacity UPS “6000DX Series”

玉井 康寛 TAMAI, Yasuhiro

木水 拓也 KIMIZU, Takuya

松永 和喜 MATSUNAGA, Kazuki

金融機関、官公庁、病院などの設備では、200V 出力の無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）の需要が多い。富士電機は、近年寄せられている市場要求に応え、三相 200V 系大容量 UPS 「6000DX シリーズ」を開発した。本シリーズの定格負荷力率は 1.0 であり、高力率負荷に標準で対応している。また、並列冗長運転方式、待機冗長運転方式などの UPS を複数台並列に接続する種々の運転方式に対応しており、信頼性の高いシステムが構築できる。電力供給の品質と信頼性をさらに向上させるとともに、液晶タッチパネルを採用することで、操作性・保守性を向上している。

Financial organizations, public offices and hospitals have great demand for an uninterruptible power system (UPS) providing 200V output. To meet this recent market demand, Fuji Electric has developed a 3-phase 200V large-capacity UPS called “6000DX Series.” This series has a rated load power factor of 1.0 and supports a high-power-factor load as standard. The series also offers various operation types to connect several UPS units in parallel, such as parallel redundant system and standby redundant system, thus making it possible to construct a highly reliable system. This product further raises the quality and reliability of power distribution. By adopting an LCD touch panel, it improves operability and maintainability.

## ① まえがき

情報化社会の発展とともに、それを支える電源に対して高信頼性化の要求が年々高まっている。最近成長著しいデータセンターにおける電源の高効率、大容量化を図るため、400V 出力の無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）の需要が増加している。一方で、電算・通信設備は 200V で動作するものも多く、200V 出力の UPS への需要も根強い。また、金融機関、官公庁、病院などで運用中の設備の更新においても、200V 出力の UPS の需要が多い。このような背景から、現行の 200V 出力 UPS 「6000D シリーズ」は、絶縁型の仕様であることから、需要家の多彩で高信頼なシステムの実現に対応できる。富士電機の UPS における主力機種となっている。

2003 年の現行機種の発売から今までに寄せられているさまざまな要求に応え、後継機種として三相 200V 系大容量 UPS 「6000DX シリーズ」を開発した。

## ② 特徴

### 2.1 定格負荷力率 1.0 対応

現行機種が開発された当時、定格負荷力率は 0.9 が主流であった。しかし、現在、主な給電先である電算設備の入力力率はほぼ 1.0 に近い設備が多くなっている。このようなことから、6000DX シリーズは、他社に先駆けて定格負荷力率 1.0 に対応した。出力性能の向上に伴い部品が大型化したのが、置換えの容易さを考慮して現行機種と同寸法とした。

### 2.2 液晶タッチパネルの採用

6000DX シリーズは、盤面に標準で装備した液晶タッチ

パネルで操作できるようにしている。系統画面や故障履歴、操作ガイダンスメニューを用意し、操作性・保守性が向上している。

### 2.3 高信頼性

UPS が導入される設備では、24 時間 365 日、安定した給電の継続が求められる。メンテナンス時や更新時、さらに万が一の故障時においても給電が継続される高信頼性システムを構成できなければならない。

UPS では並列冗長や待機冗長、ブロックリダントという運転方式で UPS を複数台並列に接続するシステム構成が代表的である。これらのシステムでは、1 台の UPS が万が一故障した場合においても、残りの UPS によって給電の継続が可能であり、信頼性を高くできる。本機種は、このような構成だけでなく、図 1 に示すように複数の並列冗長システムの 2 次側に高速切替装置を設けることにより、無瞬断で切り替えることができ、より信頼性の高いシステムも構築できる。これにより、いかなる場合においても UPS からの電力供給を確保できるので、ハイエンドユーザが要求する高信頼性システムの構成に適している。

### 2.4 高性能・高機能

#### (1) 波形ひずみ

UPS には、波形ひずみが少なく高品質の電源供給が求められる。出力電圧ひずみ率は従来 2.5% 以下（線形負荷時）であったが、今回 2% 以下に向上させ、絶縁型 UPS でトップクラスの性能を実現した。

#### (2) パワーウォークイン機能

パワーウォークイン機能は、UPS がバッテリー給電（停電運転）から非常用発電機給電に切り替える際に、供給電力をバッテリー放電電力から徐々に非常用発電機電力へ移行

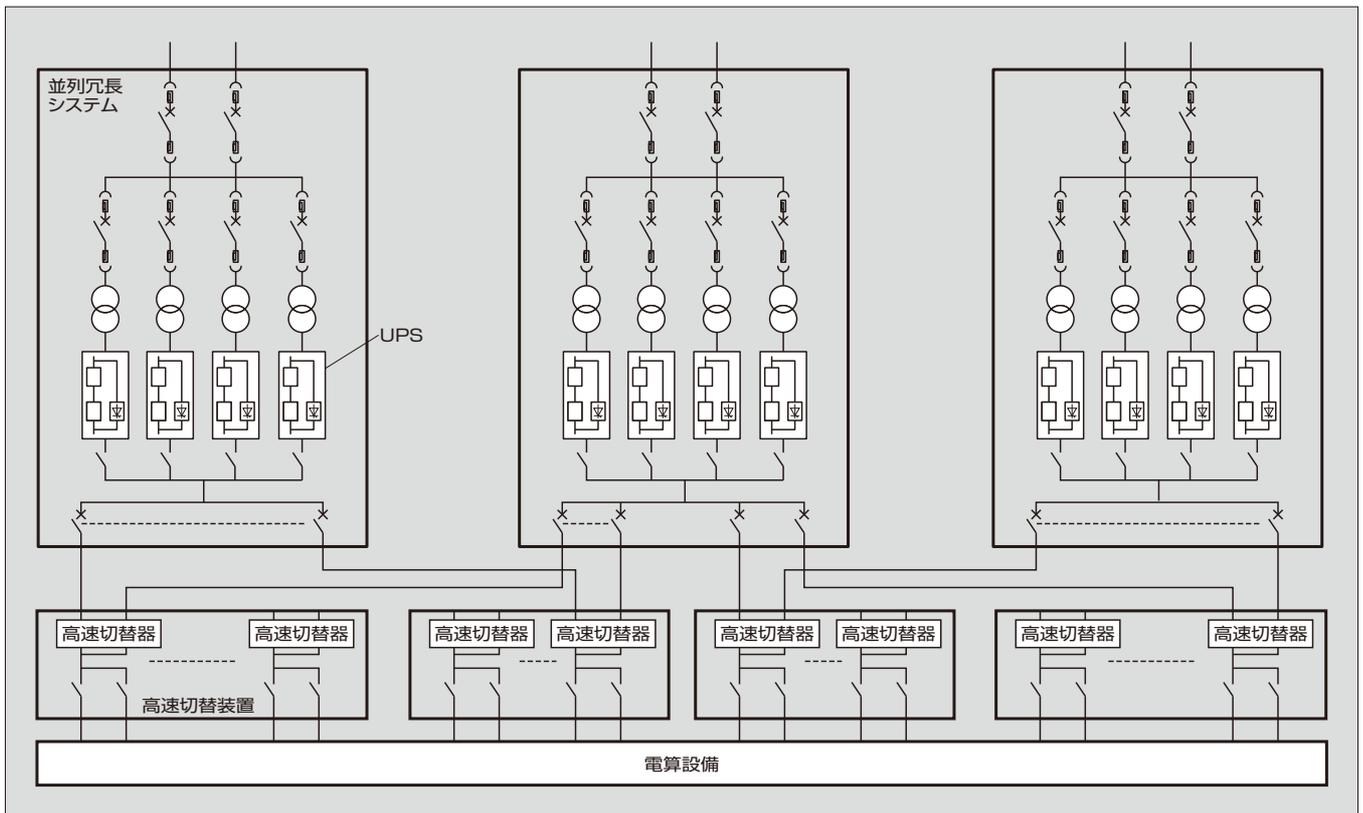


図1 並列冗長システムと高速切替装置を組み合わせた高信頼性システム

するものである。この機能を設けることにより、非常用発電機の負荷が急変することによる非常用発電機の電圧変動を抑制したり乱調を防止したりできる。

### 3 仕様

図2に6000DXシリーズの200kVA機の外観と外形図を、表1に仕様を示す。現在は、容量100～300kVAの

5機種をラインアップしている。

現行機種の定格負荷力率は0.9(遅れ)であるのに対し、6000DXシリーズは全ての定格出力容量において負荷力率が1.0であり、高力率負荷に標準で対応している。さらに、UPSの制御の高速化および高機能化を実現し、現行機種に対し、次の点で特性を改善している。

- (a) 出力電圧ひずみ率を2%以下に改善し、絶縁型UPSではトップクラスの性能を実現した(現行機種:

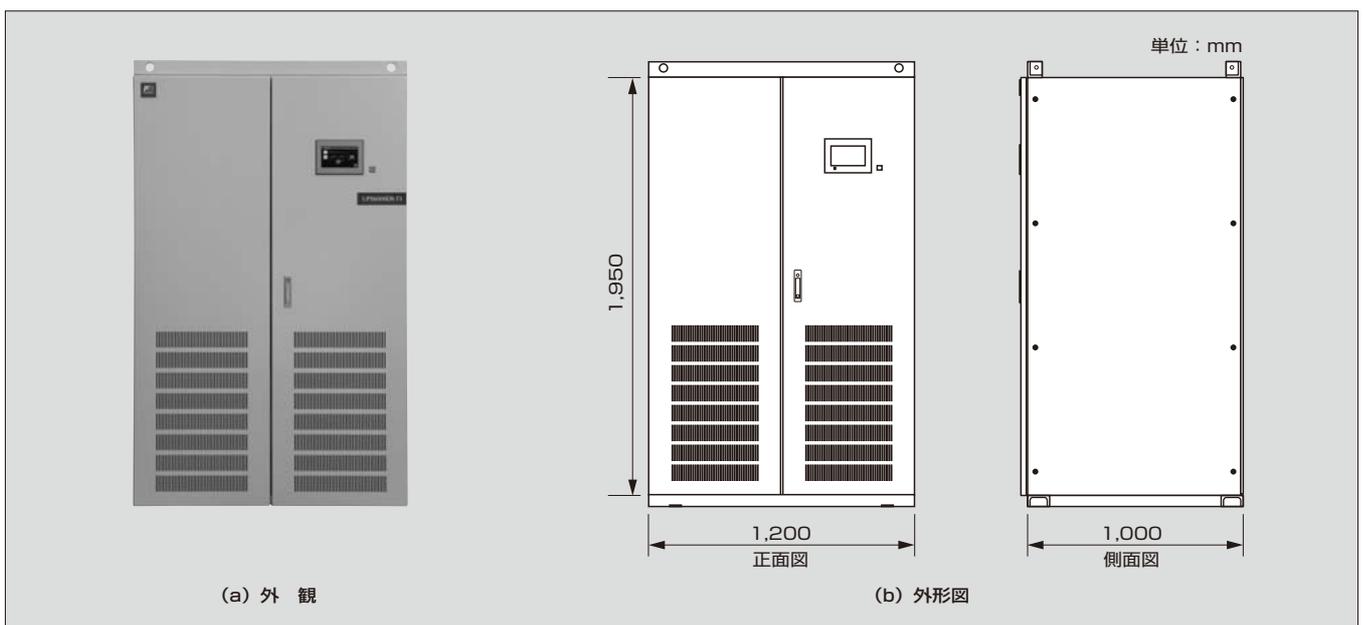


図2 「6000DXシリーズ」(200kVA機)

表 1 「6000DX シリーズ」の仕様

項目		性能・仕様
UPS方式		常時インバータ給電方式
定格出力容量		100kVA, 150kVA, 200kVA, 250kVA, 300kVA
停電切替時間		無瞬断
交流入力	相数	三相三線
	電圧	200/210V±10%
	周波数	50/60Hz±5%
	力率	0.99以上
	入力電流ひずみ率	3%以下(定格負荷時)
バイパス入力	相数	三相三線
	電圧	200/210V±10%
直流入力	定格電圧	360V (鉛蓄電池180セル相当)
	相数	三相三線
交流出力	電圧	200/210V
	周波数	50/60Hz
	負荷力率	0.7(遅れ)~1.0
	電圧精度(整定時) 平衡負荷	±1%以内
	電圧精度(整定時) 不平衡負荷	±2%以内 不平衡率1%以下
	過渡電圧変動	±3%以下(負荷0⇔100%)
	整定時間	50ms以下
	出力電圧ひずみ率	2%以下(線形負荷) 5%以下(整流器負荷)
	周波数精度	±0.01%以内(内部発振時)
	外部同期周波数範囲	±5%以下
	過負荷耐量	125% 10min 150% 1min

2.5%以下)。

- (b) 負荷急変時の電圧変動を3%以下に改善し、過渡変動を低減した(現行機種:5%以下)。
- (c) 定格負荷時の入力電流ひずみ率を3%以下に改善し、交流入力への高調波の流入をさらに抑制した(現行機種:5%以下)。

また、6000DX シリーズはシステム冗長化に対応し、最大8台までの並列運転が可能である。

高力率負荷に標準で対応するため、装置への最大入力電流は現行機種に比べて増加する。そのため、部品は電流容量の増加により大型化し、発生する熱も増加する。そこで、部品の配置や冷却構造の見直しを行うことで、現行機種と同一寸法を実現した。

#### 4 回路構成と動作

##### 4.1 主回路構成と動作概要

図3に主回路ブロック図を示す。主回路は、交流を直流に変換する整流器と、直流を交流に変換するインバータからなるダブルコンバージョン方式を採用した。蓄電池は、

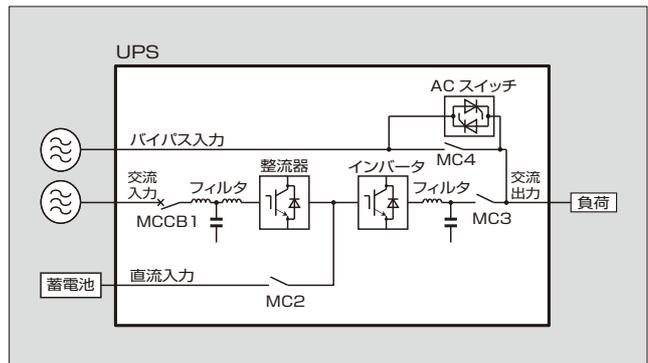


図3 「6000DX シリーズ」(100kVA機)の主回路ブロック図

装置内部の直流部に直結する。

交流入力がある通常運転状態では、交流入力の電力を整流器とインバータを通して定電圧定周波数の安定した電力にして負荷に供給すると同時に、整流器により装置内部の直流電圧を制御することで、蓄電池を充電する。交流入力に停電が発生すると、インバータを通して蓄電池の電力を交流出力に変換して負荷に供給する。このようにして、交流入力電圧の変動の影響を受けずに、負荷に安定した電力を供給する。

並列運転時は、全UPSの出力電流が等しくなるようにインバータで制御を行う。また、保守時などに1台を停止して切り離す場合や、停止状態のUPSを起動して運転中のUPSに並列接続を行う場合は、電流の分担率を緩やかに変える。このようにすることで、並列接続台数の増減による出力電圧の過渡変動を低減し、安定した電力の供給を可能にしている。

##### 4.2 交流入力の停電・復電時の特性

図4に、交流入力を停電させ、次に復電させた場合の動作波形を示す。交流入力が停電すると、整流器の動作を停止し、インバータは蓄電池の電力を利用して負荷への電力供給を継続する。

交流入力が停電した後は、復電するまで蓄電池を利用した給電を継続する、あるいはUPSへの入力電圧を非常用発電機に切り替えるなどの処置を取る。UPSは、交流入力が正常と判別すると再び整流器を起動し、蓄電池による電力供給から整流器による電力供給へと移行する。その過程においては、整流器の電流指令を直線的に緩やかに変化

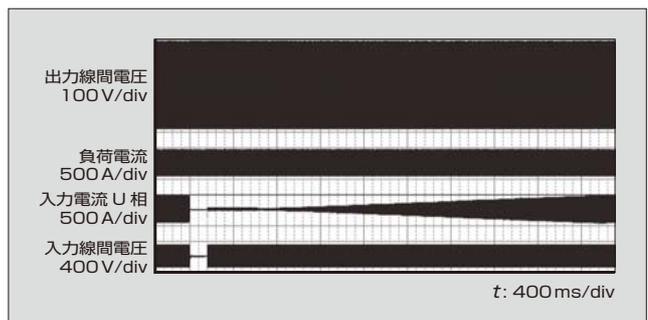


図4 交流入力の停電・復電時の動作波形

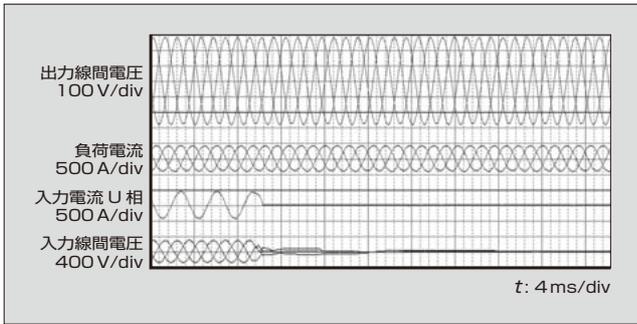


図5 交流入力that停電した直後の動作波形

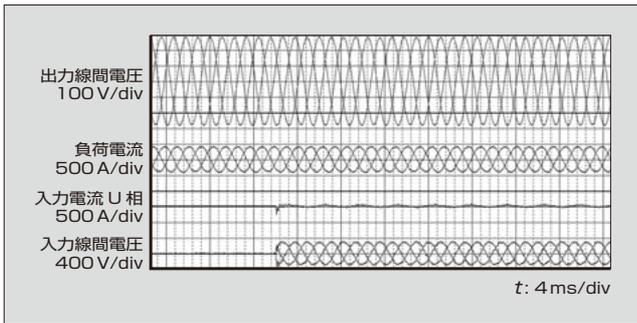


図6 交流入力that復電した直後の動作波形

させることで、整流器による供給電力を緩やかに増加させている。このパワーウォークイン機能は、復電直後に整流器による電力供給量を急激に増加させると入力電圧が低下し、その影響で再び入力電圧が正常範囲を外れる可能性があるため、入力電圧に影響を与えずに安定して復電動作を行うためのものである。

入力電圧に異常が生じた際も、停電・復電時の動作と同様に負荷への影響を与えない安定した電力供給が継続できる。

図5に、交流入力that停電した直後の動作波形を示す。インバータでは、瞬時電圧波形制御を高速で行うことで、出力電圧ひずみ率は停電発生前後ともに2%以下であり、高品質の電力供給を実現している。また、交流入力that停電して整流器が停止すると、直流電圧は直結されている蓄電池の電圧へと変化する。インバータの瞬時電圧波形制御では、直流電圧変動の影響の補正も行うことで、停電による出力電圧への影響を抑えている。その結果、停電発生直後における出力電圧変動は定格の2%以下であり、負荷への安定した電力供給を継続している。

図6に、交流入力that復電した直後の動作波形を示す。復電時においても、出力電圧の変動は定格の2%以下であり、負荷への安定した電力供給を継続している。

### 4.3 バイパス切替特性

6000DX シリーズのバイパス入力端子には交流入力を接続する。この交流入力は、装置異常時においても負荷への給電を継続するためのバックアップ電源となる。例えば、UPSの各部において過電圧や過電流が発生した場合、すぐに図3のMC4とACスイッチを投入する指令を出して、

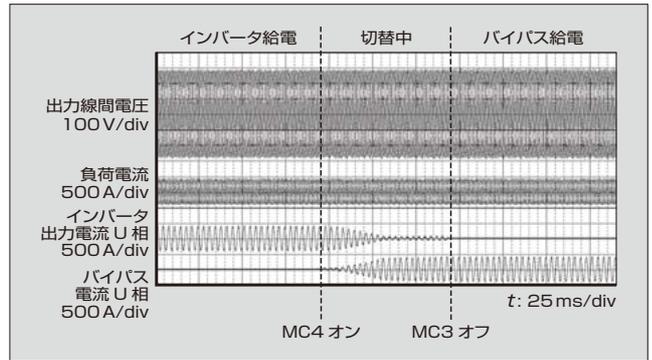


図7 インバータ給電からバイパス給電への切替時の動作波形

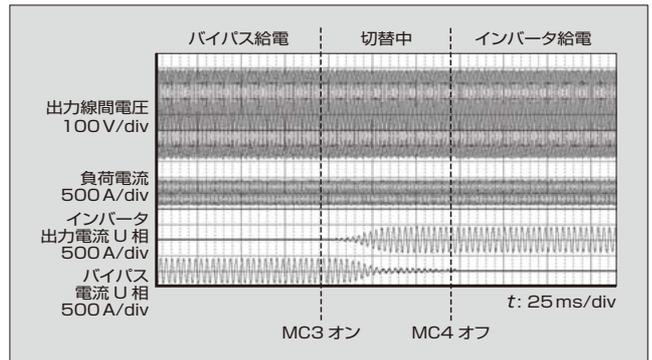


図8 バイパス給電からインバータ給電への切替時の動作波形

バイパス回路からの給電に切り替え、負荷への給電を継続する。

また、装置のメンテナンスは、バイパス給電に手動操作で切り替えた後、装置を停止させることで、負荷への給電を継続したままで行うことができる。

図7に、手動でインバータ給電からバイパス給電に切り替えたときの動作波形を示す。手動で切替操作を行うと、インバータはバイパス電圧への追従制御を開始し、バイパス電圧と同一振幅・位相の電圧を出力する。バイパス電圧への追従が完了した後、図3に示すMC4を投入してバイパスから負荷への電力供給を行う状態にし、続いてMC3をオフしてバイパス給電状態となる。

MC3とMC4が同時に投入されている期間においては、インバータからの供給電流を直線的に減少させることで、バイパス回路からの供給電流を緩やかに増加させている。この制御により、負荷の急変に伴うバイパス電圧の変動を抑制することで、手動切替の過程においても負荷への安定した電力供給を可能としている。

図8に、手動でバイパス給電からインバータ給電に切り替えたときの動作波形を示す。インバータ給電からバイパス給電に切り替えた場合と同様に、緩やかにインバータからの供給電流を増加させることでUPSの出力電圧の変動を抑え、負荷への給電に影響を与えずに、インバータ給電状態への切替を実現している。

### 4.4 並列運転時の台数切替特性

6000DX シリーズは、最大8台までの並列運転に対応し

ている。並列運転には次の特徴がある。

- (a) システムの信頼性を向上できる。例えば、負荷容量に対して冗長性を持たせて UPS の台数を設定すれば、UPS のうち 1 台が万が一故障しても、残りの健全な UPS で給電を継続できる。
  - (b) 負荷容量の増加には、UPS の増設による対応が可能であり、システム運用の効率化を図ることができる。
- UPS は、並列運転時に運転台数を変更した場合においても、負荷への安定した電力供給継続が要求される。

図 9 に、2 台の UPS による並列運転中において、1 台を手動で停止操作を行って解列(注)させたときの動作波形を示す。2 台で並列運転中に出力電流の分担に極端なアンバランスがあると、1 台に電流が集中して過電流状態になり、定格電力の供給ができなくなってしまう。そこで、それぞれの出力電流が等しくなるようにインバータで電流制御を行っている。

1 台の停止操作を手動で行うと、その UPS はインバータの出力電流指令を直線的に減少させ、運転を継続する UPS は逆にインバータの出力電流指令を直線的に増加さ

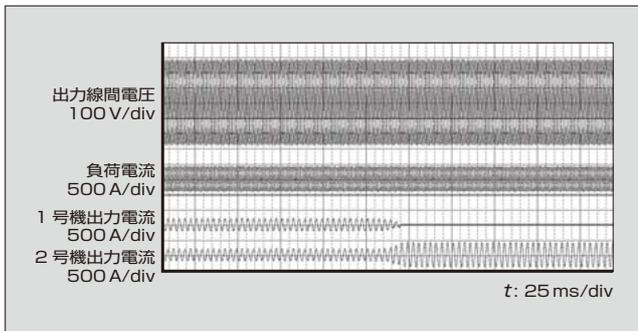


図 9 停止操作時の動作波形

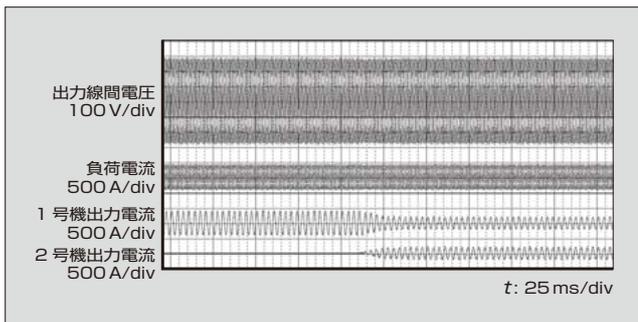


図 10 投入操作時の動作波形

〈注〉 解列：電力系統から電気設備を切り離すこと

せる。最終的には、運転を継続する UPS が負荷へ全電力を供給する状態になった後、停止操作を行った UPS はインバータを停止する。

図 10 に、1 台が運転中の状態において、さらに 1 台を投入して 2 並列での運転に移行したときの動作波形を示す。後から投入する UPS は、起動直後のインバータ出力電流指令を 0 にしておき、その後、インバータの出力電流を直線的に緩やかに増加することで、最終的に 2 台の UPS の出力電流は等しくなる。

このような動作により、各 UPS の出力電流を緩やかに変化させることで、並列運転時における UPS の投入・停止動作に伴う出力電圧の過渡変動を抑え、負荷への安定した電力供給の継続を実現している。

## 5 あとがき

三相 200V 系大容量 UPS 「6000DX シリーズ」について述べた。本機種は、近年増加している高力率負荷に対応するとともに、タッチパネル操作に変更することで操作性の向上を図ったことから、電源設備への幅広い適用が期待できる。

今後は、300kVA 以上の大容量機種のラインアップを拡充していくとともに、新技術・新機能の開発に注力し、幅広いお客さまのニーズに応えていく所存である。



### 玉井 康寛

中大容量 UPS の設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレ機器事業本部パワーサプライ事業部開発部。電気学会会員。



### 木水 拓也

中大容量 UPS の設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレ機器事業本部パワーサプライ事業部開発部。



### 松永 和喜

中大容量 UPS の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ーエレ機器事業本部パワーサプライ事業部エンジニアリング部。

# 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」

General-Purpose Inverters Meeting Global Standards, “FRENIC-HVAC/AQUA Series” and “FRENIC-Ace Series”

河野 博之 KONO, Hiroyuki

三垣 巧 MIGAKI, Takumi

皆見 崇之 KAIMI, Takashi

近年、汎用インバータに要求される機能が多機能化し、専用のコントローラや可変速駆動装置を適用してきた分野においても、汎用インバータをカスタマイズして適用するケースが増加している。また、製品のグローバル化の要求も増加している。これらのニーズに応えるため、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」を開発した。カスタマイズロジック機能の標準搭載をはじめ、多言語対応機能やリージョンコードの導入など、グローバル化に対応した製品であるとともに、ノイズや機能安全などに関する国際標準規格に適合している。

In recent years, general-purpose inverters have been required to be multi-functional. Even in the areas where dedicated controllers or specialized variable speed drives were conventionally used, in an increasing number of cases customized general-purpose inverters are being adopted. The demand for product globalization is also increasing. To satisfy these needs, Fuji Electric has developed the “FRENIC-HVAC/AQUA Series” and “FRENIC-Ace Series” general-purpose inverters that meet global standards. These products are supporting our globalization by featuring a customized logic function as standard and introducing multi-language support and region codes. They also comply with international standards regarding noise immunity and functional safety.

## 1 まえがき

汎用インバータは、ファン・ポンプの省エネルギー化、ならびに産業機械の省力化や自動化などの幅広い用途で使用されている。富士電機では、ファン・ポンプ向けに適した負荷変動が少ない単純可変速のシリーズから、上下搬送装置向けに適した高性能ベクトル制御を搭載したシリーズまで、幅広くラインアップしている。

今回開発した「FRENIC-HVAC/AQUA シリーズ」および「FRENIC-Ace シリーズ」は、グローバル化に対応した製品であるとともに、インバータが適用される最終製品に応じた国際規格に適合している。本稿では、これらのインバータについて述べる。

## 2 グローバル対応機能の拡大

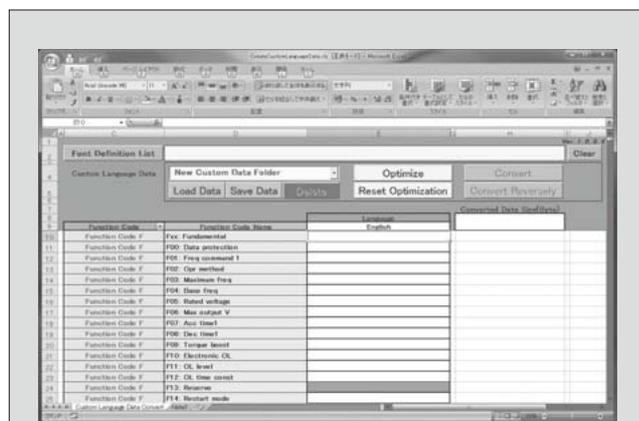
### 2.1 多言語対応機能

グローバル化に対応するために必要な機能の一つとして、表示器における多言語対応がある。ユーザにとって自国の言語を使って機能コードなどのインバータ情報の確認ができることは、単に見やすさだけでなく、設定ミスや誤った理解に伴う事故を減らすことにつながる。

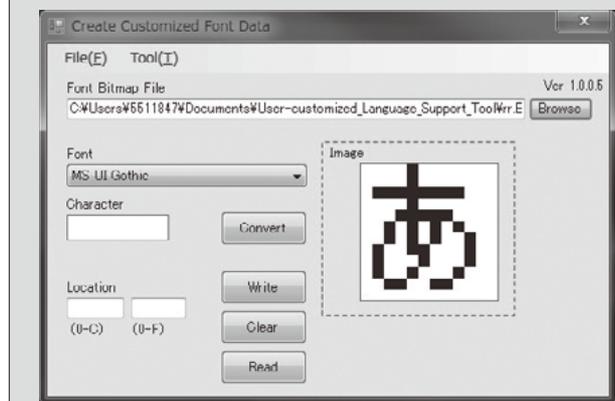
従来、富士電機のインバータシリーズでは、仕向け先別に日本語を含む6言語を基本として搭載していた。これをFRENIC-HVAC/AQUA シリーズでは、標準搭載の言語を19言語に増やして言語による障壁を低くした。19言語は、日本語、英語、ドイツ語、フランス語、スペイン語、イタリア語、中国語、ロシア語、ギリシャ語、トルコ語、ポーランド語、チェコ語、スウェーデン語、ポルトガル語、オランダ語、マレー語、ベトナム語、タイ語、インドネシア語である。

### 2.2 ユーザカスタマイズ言語作成ツール

19言語を表すための文字は、19言語以外の言語にも使用できるが、独特な文字を必要とする言語が多くある。また、同じ英語圏でも国によって用語が異なるので、富士電



(a) データ作成画面



(b) 文字編集画面

図1 ユーザカスタマイズ言語作成ツールの編集画面

機が通常使用している表記ではユーザにとって理解が難しい場合がある。

そこで、あらゆる文字に対応できるユーザカスタマイズ言語作成ツールを開発した。このツールの編集画面を図1に示す。図1(a)に示すデータ作成画面から、微妙な言語表現(言い回し)を設定することができる。また、図1(b)に示す文字編集画面で作成した文字は、文字データとして保存することができるため、作成した文字データを19言語以外にも流用することができる。

### 2.3 リージョンコードの導入

従来、富士電機のインバータは、日本、アジア、中国、台湾、欧州、北米、韓国の各地域向けに言語や電源仕様(電圧、周波数)の設定、端子形状・仕様の異なる7モデルを用意していた。

しかし、各地域に出荷された後にユーザの機械装置に搭載され、さらに別地域に出荷される場合も多く、最終出荷地域で同一仕様の品が調達しにくいことや端子形状・仕様の相違により作業者が困惑することなどの課題があり、ユーザから現地調達の容易化や仕様の共通化を望む声があった。

これらの課題に対し、海外向けモデルを対象にハードウェア構成の集約と共通化を図ったグローバルモデルを用

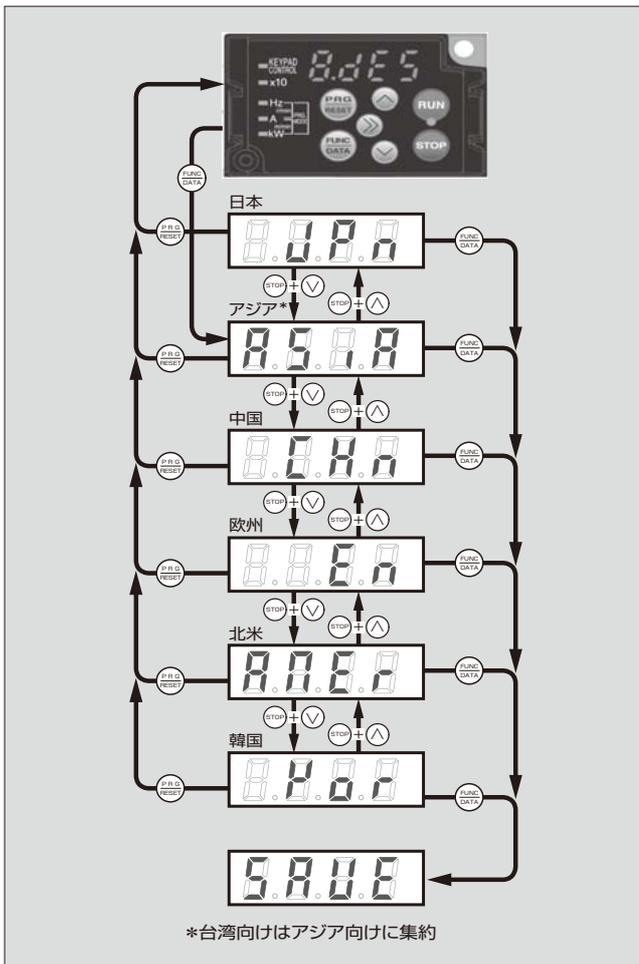


図2 リージョンコードの設定

意した。従来、出荷時に各地域向けモデル別に設定していた言語や電源仕様(電圧、周波数)を、図2に示すようにユーザが導入時にリージョンコード(region code)を選択するだけで自動で設定できるようにした。

この集約と共通化により海外向けモデル数を従来の1/3と大幅に削減し、ユーザのグローバル調達、在庫管理の省力化やセットアップ作業の容易化を実現した。

### 2.4 カスタマイズロジック機能の標準搭載と拡充

FRENIC-Aceシリーズでは、大幅に機能を拡充したカスタマイズロジック機能を標準で搭載した(図3)。

従来、標準仕様のインバータでの対応が難しいエンドユーザや機械セットメーカーの求める専用機能は、インバータ本体のソフトウェアの機能を向上した特殊品や、外部制御機器を用いて対応してきた。カスタマイズロジック機能を拡充し、標準で搭載したFRENIC-Aceシリーズでは、このような用途にも標準仕様のインバータだけで対応できるようになった(図4)。その結果、世界各地の販売拠点のエンジニアリング部門、システムインテグレータ、

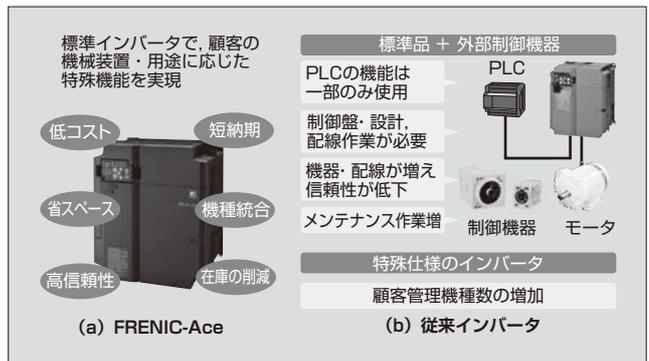


図3 カスタマイズロジック機能

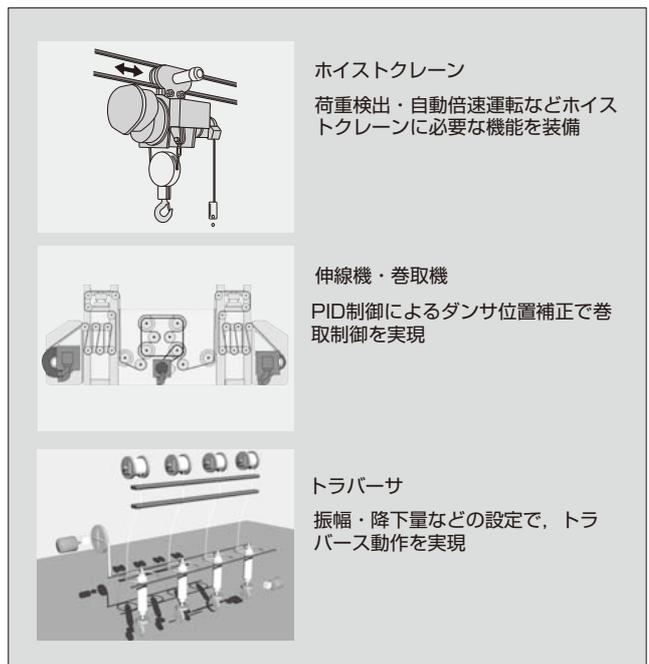


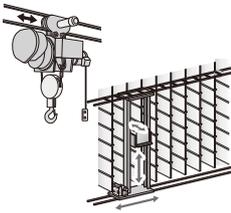
図4 カスタマイズロジック機能の適用例

マシンビルダーおよびエンドユーザ自身によるプログラミングができるようになった。

### 2.5 4種類の過負荷定格

FRENIC-Ace シリーズは、適用する機械装置に応じた重過負荷定格（HHD 定格）と軽過負荷定格（HND 定格）の2種類の“過負荷定格”と、インバータが設置される周囲温度が40℃と50℃を上限とする2種類の“温度定格”を選択でき、1型式で合計4種類の定格に対応した（図5）。

立体倉庫などにおける高頻度で起動・停止を繰り返す上下搬送装置、食品加工機械や材料加工における高粘度材料の攪拌（かくはん）機および粉碎機などでは、重過負荷定格が適している。ファン・ポンプ、遠心分離機、コンベアなど穏やかな加速・減速動作、連続回転など過負荷耐量をあまり必要としない場合は、軽過負荷定格が適している。軽過負荷定格は、重過負荷定格に比べて同じ出力のモータに対し、容量が1ランク小さいインバータが採用できる。さらに周囲温度が40℃の環境では、容量が2ランク小さい定格（ND 定格）のインバータが採用できるようになり、世界的に市場の大きいファン・ポンプ用途やユーティリティ用途への適用が容易となった。

適用モータ			
主な用途	搬送装置、 上下搬送装置、 高粘性液体ポンプ、 攪拌機、包装機械など 	ファン・ポンプ、 可変速コンベアなど 	
過負荷耐量	150% 1 min 200% 0.5 s	120% 1 min	
周囲温度	50℃	HHD*1 定格 FRENIC-Ace 18.5kW 	HND*2 定格 FRENIC-Ace 15kW (容量1ランク ダウン) 
	40℃	HD*3 定格 FRENIC-Ace 15kW (容量1ランク ダウン) 	ND*4 定格 FRENIC-Ace 11kW (容量2ランク ダウン) 

\*1 HHD : High carrier frequency Heavy Duty  
\*2 HND : High carrier frequency Normal Duty  
\*3 HD : Heavy Duty  
\*4 ND : Normal Duty

図5 4種類の過負荷定格

### ③ 国際標準規格への対応

#### 3.1 インバータの国際標準規格

インバータの輸出においては、輸出先の規格に適合することが必須である。例えば、欧州向けには EN61800-3 および EN61800-5-1、北米向けには UL508c への適合が必要となる。アジアなどの独自の規格がない地域においては、EN や UL の規格の適合が入札条件となる。FRENIC-HVAC/AQUA シリーズおよび FRENIC-Ace シリーズは、これらの規格に適合している。近年は、規格要求の高まりとともに、インバータが設置される環境に応じた条件への適合が求められる、これに対応している。

#### 3.2 設置環境に応じた規格への適合

表1に、FRENIC-HVAC/AQUA シリーズ、FRENIC-Ace シリーズが適合している規格を示す。

FRENIC-HVAC/AQUA シリーズは、ファン・ポンプ用途向けで使用されるインバータであるため、設置先の環境が工場だけでなく、ビル、店舗、駅などの商業施設に及ぶ。工場への設置においては、より長いモータケーブルに対応することが望ましい。商業施設においては、発生ノイズを抑制してより厳しい制限値に合格する必要がある。また、駅への設置では、鉄道設備用の EMC 規格取得が求められる場合がある。このように設置環境に応じた要求を基に、表1に示す規格を選択して適合性評価を受けている。

工作機やプラント用途である FRENIC-Ace シリーズは、機能安全にも対応している。

ユーザがインバータを選定する際には、ユーザの設備に必要な規格とインバータの適合規格を比較しながら選定する。しかし、EMC 規格の条件において、メーカーの指定

表1 適合規格

シリーズ名	規格	規格名称・条件
FRENIC-HVAC/AQUAシリーズ	EMC*1	EN61800-3*3 C1 : モータケーブル10m C2 : モータケーブル75m/ 150m C2/C3 : モータケーブル30m EN50121-5
	瞬時停電耐量	SEMI F47-0706
	安全	EN61800-5-1 UL508c
	機能安全	-
FRENIC-Aceシリーズ	EMC*2	EN61800-3*3 C2 : モータケーブル10m
	安全	EN61800-5-1 UL508c
	機能安全	ISO13849-1 EN61508-1~7 EN61800-5-2

\*1 フィルタ内蔵  
\*2 外付けEMCフィルタ  
\*3 10m : 一般産業用  
75m/150m : ファン・ポンプ用  
30m : 漏電遮断器を使用する設備用  
C1 : 住宅、商業地域用  
C2 : 住宅、商業地域用(専門家の監督の下で施工)  
C3 : 工業環境用

条件とユーザの使用条件は必ずしも一致しない。両者の条件が不一致の場合は、ユーザ側で適合性を証明する義務があるため、ユーザにとって大きな負担となる場合があった。近年のファン・ポンプ用途向けのインバータでは、メーカーが代表的な設置環境で認定を取得する傾向がある。ユーザは個別に適合性評価のための試験を行う必要がなくなるが、逆にメーカー側で、より多くの条件で認定を取得する必要がある。

### 3.3 EMI フィルタの設計

1機種で複数のインバータで複数の EMC 規格に適合するためには、EMI フィルタの設計が重要である。図 6 に、EMI フィルタ回路の例を示す。

インバータの発生ノイズは、モータケーブルの自己インダクタンスおよび静電容量により生じる LC 共振周波数にピークがある周波数特性を持つ。ノイズフィルタの設計手法として、フィルタの減衰特性が最大になる周波数をノイズのピークと一致させることで、フィルタを小型化できることが知られている。しかし、インバータ発生ノイズの共振周波数がケーブル長により変化する可能性がある場合、従来は全周波数域で高い減衰特性を持たせる設計を行っていた。その代表例が図 6 (a)に示す 2 段フィルタである。この設計ではフィルタの小型化および内蔵化が困難であり、周波数によっては減衰量が過剰となる点が課題であった。課題解決のため、FRENIC-HVAC/AQUA シリーズでは根本的に見直しを行い、図 6 (b)に示す EMI フィルタ回路とした。

従来の 2 段フィルタにおいて、小型化の障害となる部品はコモンモードリアクトルである。コモンモードリアクトルはケース付きのフェライトコアに巻線加工をしたもので、その体積とコストはフィルタの 7 割を占めるため、2 段化により EMI フィルタの体積とコストも 2 倍となってしまう。

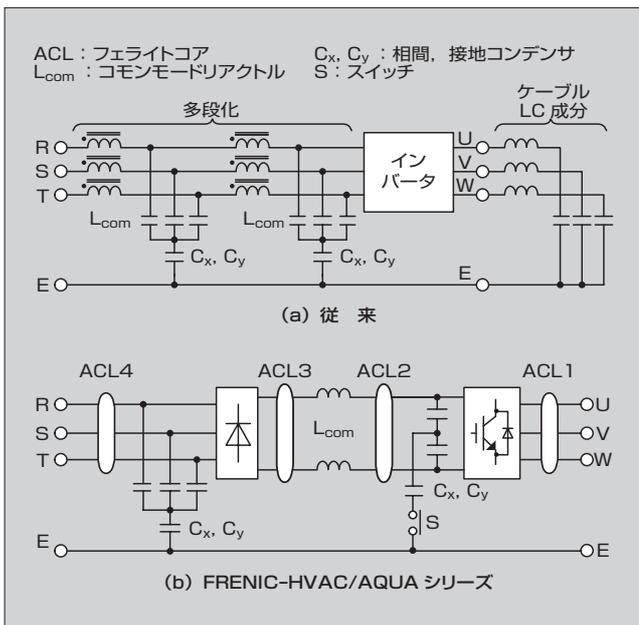


図 6 EMI フィルタ回路の例

う。そこで、FRENIC-HVAC/AQUA シリーズではフィルタの 2 段化は行わず、回路の各部にフェライトコアを分散配置してフィルタのインピーダンスを調整した。フェライトコアは裸のコアを既存の内部配線に固定するだけで設置が可能のため、非常に安価である。また、内部配線の近辺は空きスペースとなっていることが多く、フェライトコアを追加してもフィルタの体積はほとんど増加しない。フェライトコアによるインピーダンス調整の結果、1 段フィルタに近い体積とコストで 2 段フィルタと同等のノイズ減衰量を実現した。

インピーダンスを調整する上で最も重要となるのがフェライトコアの選定である。FRENIC-HVAC/AQUA シリーズでは、種々のコア材料とコアサイズを組み合わせた 30 種類のフェライトコアを候補とし、各配置先において最小サイズで必要なインピーダンスが得られるよう選定した。材料とサイズの組合せを変えることで、回路構成を変更することなく減衰量を調整することができる。1 台のインバータで複数のケーブル条件に適合する内蔵 EMI フィルタを FRENIC-HVAC/AQUA シリーズの全容量において実現した。

### 3.4 雑音端子電圧

図 7 に、FRENIC-HVAC/AQUA シリーズの雑音端子電圧の測定結果を示す。モータケーブルが異なるためノイズのピークが大きく異なるが、それぞれの規格の限度値以下であることが分かる。規格値に対して過剰設計となっている周波数帯はほとんどなかった。図 7 の波形において図 6 (b)のスイッチ S はオン状態であり、大容量接地コンデンサを接続することで、C1 規格や C2 規格に適合するために必要な高い減衰特性を得ている。しかし、この大容量接地コンデンサは電源の漏れ電流を増加させるため、一次電

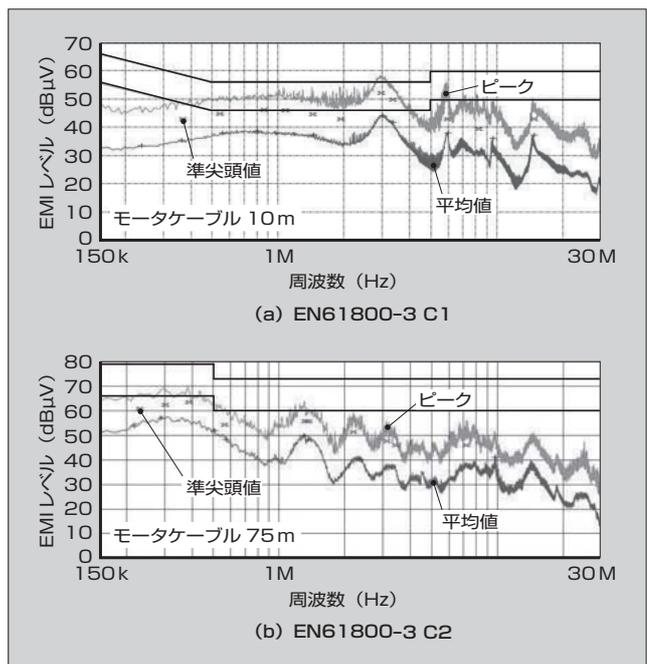


図 7 FRENIC-HVAC/AQUA シリーズの雑音端子電圧

源側に配置した漏電遮断器を誤動作させるなど、障害の原因となる可能性がある。そこで、C1 規格や長距離モータケーブルへの対応が不要なユーザについては、図 6 (b)におけるスイッチ S を解放することで、規格を満足したまま漏れ電流を低減して漏電遮断器の設置された環境に使用することができる。

#### 4 あとがき

富士電機のグローバル対応の汎用インバータ「FRENIC-HVAC/AQUA シリーズ」および「FRENIC-Ace シリーズ」について、その特徴を述べた。お客さまの要求を満たすための多機能化とグローバル化の流れは今度も継続すると思われる。いち早くその流れをくみ取り、真のグローバル製品の創出を追求していく所存である。



#### 河野 博之

可変速駆動装置の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部ドライブ事業部開発部グループリーダー。



#### 三垣 巧

可変速駆動装置の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部ドライブ事業部開発部グループリーダー。



#### 皆見 崇之

可変速駆動装置の EMC フィルタ開発に従事。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開発部。



# 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」

690-V Inverters Equipped with SiC Hybrid Module, “FRENIC-VG Stack Series”

佐藤 和久 SATO, Kazuhisa

高野 信 TAKANO, Makoto

野村 和貴 NOMURA, Kazuki

富士電機では、業界最高クラスの性能を持つ「FRENIC-VG シリーズ」に、690 V 系列のスタックタイプを用意している。船舶や海外の化学プラント、鉱業、水処理設備などでの需要が多く、これまで 90 ~ 315 kW の容量であった 690 V 系列に、355 ~ 450 kW の容量をラインアップに追加した。低損失の SiC ハイブリッドモジュールを搭載することで大容量化に伴う製品の大型化を抑制し、製品の幅寸法を 220 mm に維持している。また、複数台のスタックの並列接続により、2,700 kW までの多巻線モータの駆動や、ダイレクトパラ接続方式による 1,200 kW までの大容量単巻線モータの駆動を可能にした。

Fuji Electric offers 690-V stack type of the “FRENIC-VG Series” that has the highest-level performance in the industry. The 690-V inverters have seen high demand from the marine industry, overseas chemical plants, mining and water treatment facilities and their conventional capacities were between 90 and 315 kW. Now capacities from 355 to 450 kW have been added to the lineup. Incorporating a SiC hybrid module with low power dissipation prevents the product from becoming larger due to capacity enlargement, and keeps the product width to 220 mm. Connecting multiple stacks in parallel makes it possible to drive multi-winding motors up to 2,700 kW. Having a direct parallel connection enables large-capacity single-winding motors to be driven up to 1,200 kW.

## ① まえがき

近年、鉄鋼プラントや大型クレーンなどの大規模設備で使われるインバータに対して、大容量化や高応答・高精度化の要求が高まるとともに、設置や交換作業などのメンテナンス性の向上と省スペース化が求められている。

こうしたニーズに応えるため、業界最高クラスの性能を持つ「FRENIC-VG シリーズ」のラインアップに、400 V 系列のスタックタイプを 2012 年度に加えた。また、船舶や海外の化学プラント、鉱業、水処理設備などで需要が多い 690 V 系列インバータのスタックタイプを、2014 年 6 月に発売した。図 1 に製品の適用先を示す。

今回、90 ~ 315 kW の容量であった 690 V 系列に、355 ~ 450 kW の容量をラインアップに追加した。低損失の SiC ハイブリッドモジュールを搭載することで、大容量化に伴う製品サイズの大型化を抑制している。図 2 に製品の外観と盤への収納例を示す。



図 1 690 V 系列インバータ「FRENIC-VG スタックシリーズ」の適用先

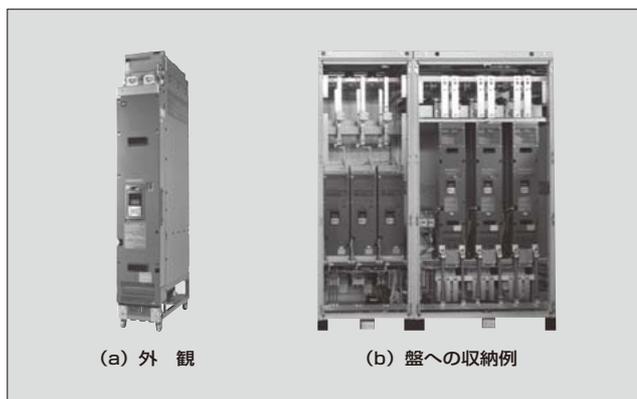


図 2 690 V 系列インバータ「FRENIC-VG スタックシリーズ」

本稿では、SiC ハイブリッドモジュールとこれを搭載した 690 V 系列インバータ「FRENIC-VG スタックシリーズ」について述べる。

## ② SiC ハイブリッドモジュール

355 ~ 450 kW の容量の 690 V スタックに搭載した SiC ハイブリッドモジュールは、SiC-SBD (Schottky Barrier Diode) と Si-IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) で構成している。これは、富士電機製 1,700 V 耐圧 SiC-SBD チップと第 6 世代「V シリーズ」IGBT チップを使用したものである。SiC ハイブリッドモジュールの外観および回路構成を図 3 に示す。

### 2.1 SiC ハイブリッドモジュールの特徴

SiC ハイブリッドモジュールは、少数キャリアの注入がないユニポーラデバイスである SiC-SBD を使っているため、スイッチング動作時において逆回復損失  $E_{rr}$  がほとん

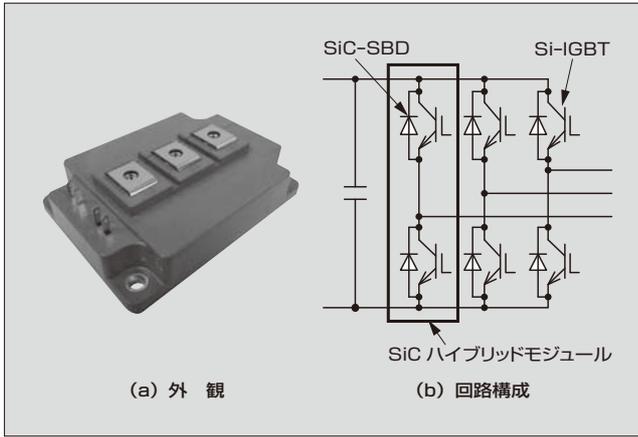


図3 SiC ハイブリッドモジュール

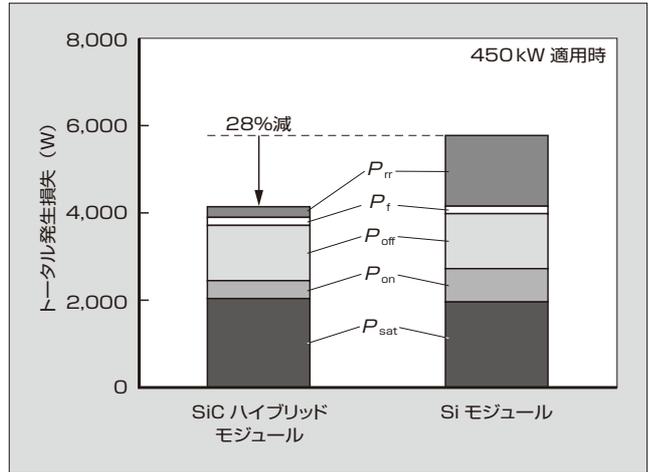


図5 モジュールのトータル発生損失

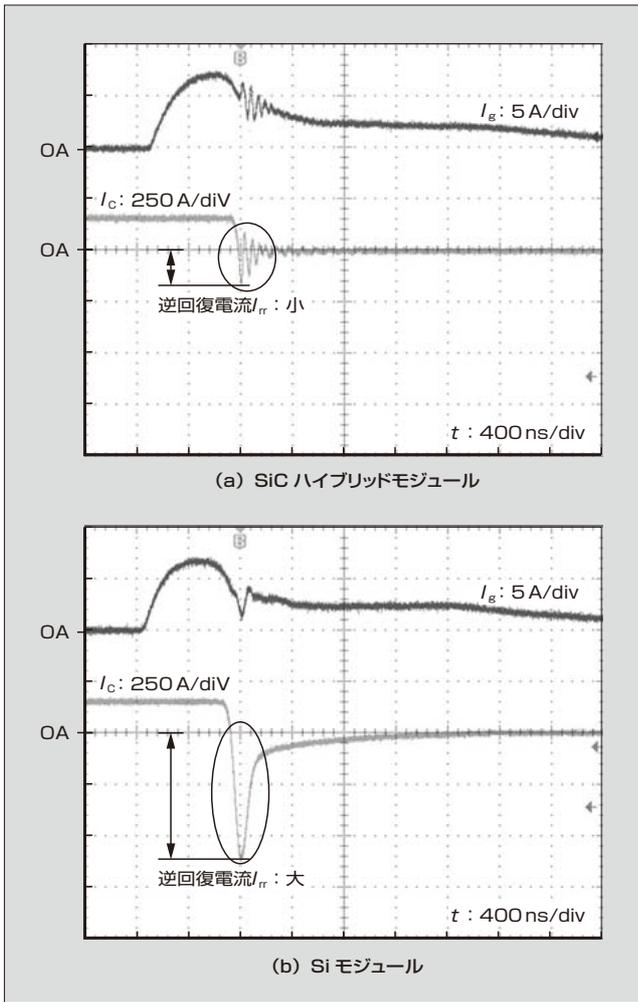


図4 モジュールの逆回復電流波形

ど発生しないという特徴がある。図4に、モジュールの逆回復電流波形を示す。従来のSiモジュールに比べてSiCハイブリッドモジュールの逆回復電流が大幅に小さくなっている。さらに逆回復電流の低減は、対向アームIGBTのターンオン損失 $E_{on}$ の低減にもつながる。

図5に、450kWスタックに搭載した場合のSiモジュールとSiCハイブリッドモジュールのトータル発生損失の比較を示す。SiCハイブリッドモジュールの $P_{rr}$ は、Siモ

ジュールに比べて約85%低減し、 $P_{on}$ は約45%低減する。トータル発生損失は28%低減され、装置の小型化や容量の拡大が可能となる。

## 2.2 SiC ハイブリッドモジュールの適用における課題と対策

SiCハイブリッドモジュールは、Siモジュールよりも高速でスイッチングを行う。そのため、デバイスを並列に接続した場合に電流の分担を適切にして、動作の安定化を図る必要がある。さらに、インダクタンスの低減と均等化を行い、インピーダンスのマッチングを行うことで発振現象を抑えてEMCの低ノイズ化を図る必要がある。

そこで、配線インダクタンスの電磁解析シミュレーション(図6)により、電流分担の最適化およびモジュール内部インピーダンスとゲートドライブ回路のインピーダンスのマッチングを行い、ゲート発振を抑えたスイッチング動作を得ている。

また、海外向けのインバータでは、輸出先ごとの規格に適合することが必須である。特にEMC規格であるEN61800-3の放射ノイズをクリアするため、次の施策を行った。

SiCハイブリッドモジュールは高速でスイッチングするため、インバータから発生する放射ノイズは増加する。従来の放射ノイズの対策は、インバータを盤に収納することやインバータの出力ケーブルに零相リアクトル(コモン

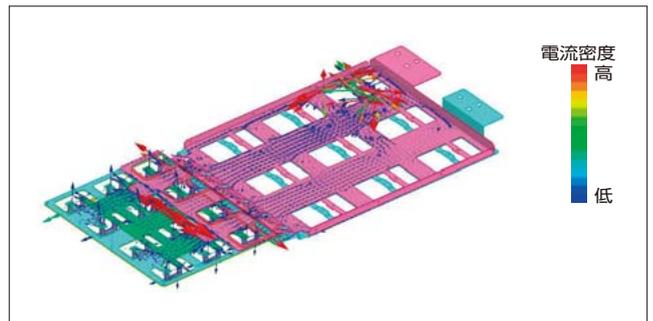


図6 配線インダクタンスの電磁解析シミュレーションの例

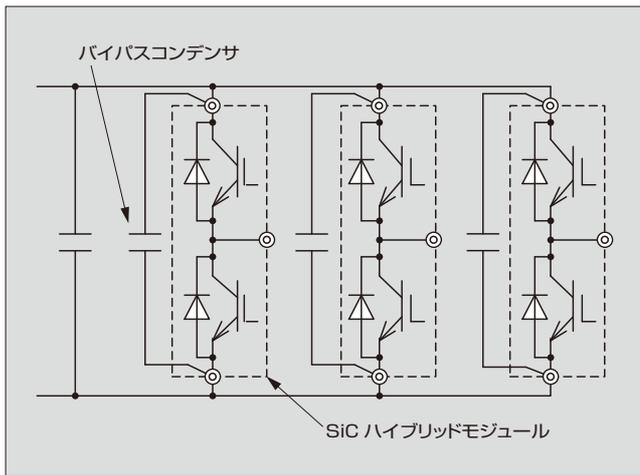


図7 SiC ハイブリッドモジュールに接続したバイパスコンデンサ

モードリアクトル) を挿入することで行っていた。しかし、このようなインバータの外部での対策は、SiC ハイブリッドモジュールの適用で増加した放射ノイズに対しては低減効果が十分ではない。

一方で放射ノイズは、ノイズ電流が流れるループ(放射面積)の大きさに比例するので、このループを小さくするためにノイズ源の近傍で対策を行うと効果的である。そこで、FRENIC-VG スタックシリーズでは、ノイズ源である SiC ハイブリッドモジュールの直近に、周波数特性の良いバイパスコンデンサを並列に接続して放射ノイズを低減した(図7)。

### ③ 690V 系列インバータ「FRENIC-VG スタックシリーズ」

#### 3.1 製品ラインアップ

690V 系列インバータ「FRENIC-VG スタックシリーズ」のラインアップを図8に示す。インバータ、PWMコンバータ、フィルタスタック、ダイオード整流器を同一形状のスタックとして用途に応じて選択できる。SiCハ

形状	シリーズ	形状構成	仕様 (適用負荷)	標準適用モータ容量 (kW)				
				50	100	500	1,000	5,000
 スタック	インバータ 「FRENIC-VG」	単機	MD (LD)	90 (110)	450 (450)	1,200 (1,200)	2,700 (2,700)	
	PWMコンバータ 「RHC-D」*	単機	MD (LD)	132 (160)	450 (450)	1,200 (1,200)	2,700 (2,700)	
	フィルタスタック 「RHF-D」*	単機	—	160	450			
	ダイオード整流器 「RHD-D」	単機	MD (LD)	220 (250)	450 (450)	2,000 (2,000)		

\* 2015年度発売予定

図8 690V 系列インバータ「FRENIC-VG スタックシリーズ」のラインアップ

イブリッドモジュールを新たに搭載した単機容量 355 ~ 450kW のインバータを追加して、90 ~ 450kW の範囲のインバータをそろえた。モータのさらなる大出力化に対応する場合には、巻線分割を行った大容量多巻線モータを使用するか、スタックを並列に接続することで出力容量を拡大する。

FRENIC-VG では、最大6巻線までの多巻線モータを駆動することができ、2,700kW までの容量に対応が可能である。また、限流用リアクトルを使用せずにスタックを並列で接続することで大容量単巻線モータを駆動できるダイレクトパラ接続方式にも対応している。このダイレクトパラ接続方式は、図9に示すように、最大3台のスタックをモータ端子部で並列接続することで、1,200kW までの大容量単巻線モータの駆動が可能である。

なお、各スタック間の出力電圧の誤差により、誤差電流(横流)が生じる。従来は、限流用リアクトルを挿入することで横流を抑えていた。FRENIC-VG では、制御ソフトウェアによる横流抑制制御を適用することにより、限流用リアクトルを不要にした。この横流抑制制御と出力動力

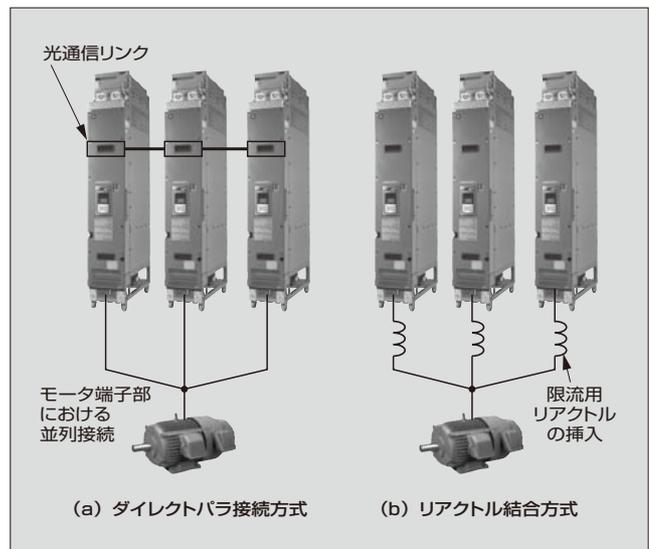


図9 スタックの並列接続方式

線の内部インダクタンスにより、スタックの並列接続を可能としている。

### 3.2 スタックタイプの特徴

#### (1) 製品の幅寸法の統一

690 V 系列インバータの FRENIC-VG スタックシリーズは、スタック幅を 220 mm に統一し、盤への収納性を高めることにより、省スペース化とトータルコストダウンを可能にした。

特に、355 ～ 450 kW のスタックについては、[2章](#)で述べたとおり、SiC ハイブリッドモジュールを搭載することにより、Si モジュールに比べてトータル発生損失を 28% 低減している。これにより、モジュールの冷却体部分の容積を従来のままとし、スタック幅を 220 mm に維持することができた。

従来、690 V 系列の 450 kW のインバータを構築するには、[図 10](#) に示すように、ダイレクトパラ接続によって 250 kW のスタックを 2 並列で構成する必要があった。SiC ハイブリッドモジュールを搭載した 450 kW スタックであれば、スタックは 1 台だけで駆動できるので、盤の小型化に大きく貢献できる。

#### (2) 用途に応じたコンバータの選択

オールインワンのユニットタイプと異なり、スタックタイプではコンバータ部とインバータ部を別々のスタックに分離して構成した。

これによって用途に応じたコンバータの選択が可能となり、電源回生がない用途ではダイオード整流器を、電源回生もしくは高調波抑制が必要な用途には PWM コンバー

タを選択できる。

#### (3) 直流配電による省スペース化

直流部分でコンバータ部とインバータ部を分離した構成としているため、直流母線間のエネルギー授受を目的とした直流配電によるマルチドライブの構成が可能となる。これによってコンバータ容量の削減や、大容量システムの構築が容易になり、盤の省スペース化が実現できる。

#### (4) メンテナンス性の向上

重要設備では、トラブル発生時や設備更新時などにおいて、インバータの交換に必要な作業時間の短縮が求められる。

スタックタイプでは、キャスターによる引出し構造や交換用リフターを準備することにより、従来のユニットタイプと比較して大幅な作業時間の短縮を実現している。

## 4 あとがき

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」について述べた。

今後は、ダイレクトパラ接続方式において、横流抑制制御の制御ソフトウェアを拡張して並列接続数を増やすことにより、690 V 系列インバータシステムの適用分野を拡大していく所存である。

### 参考文献

- (1) 田中正男ほか. 高性能ベクトル制御形インバータ「FRENIC-VG」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.3, p.199-203.

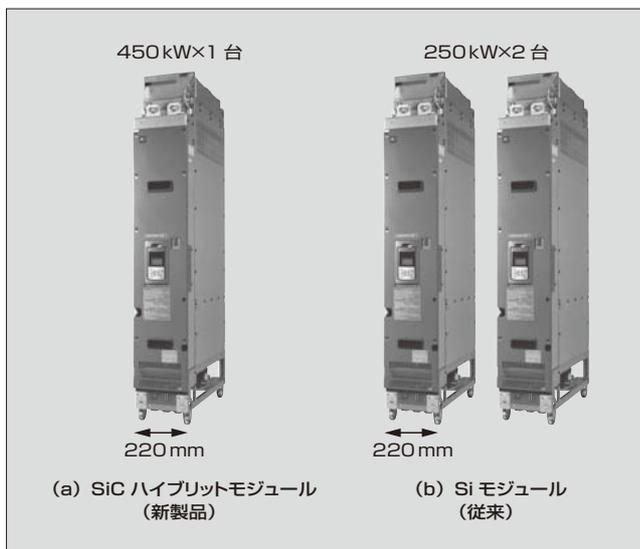


図 10 SiC ハイブリッドモジュール適用による省スペース化



#### 佐藤 和久

可変速駆動装置の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレクトロニクス事業部開発部グループリーダー。



#### 高野 信

可変速駆動装置の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレクトロニクス事業部開発部グループリーダー。



#### 野村 和貴

可変速駆動装置の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレクトロニクス事業部開発部。

# 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——

Fuji Electric's Top Runner Motor —  
Loss-Reduction Technology of “Premium Efficiency Motor”

館 憲弘 TACHI, Norihiro

鯉淵 博文 KOIBUCHI, Hirobumi

高橋 和利 TAKAHASHI, Kazutoshi

モータは、社会生活や産業活動に欠かせないキーコンポーネントであり、その使用電力量は全世界の使用エネルギーの約40%に達する。そのため、モータの高効率化が世界の主要国の課題であり、日本ではトップランナー制度によって2015年4月から効率の規制が始まる。富士電機が開発した「プレミアム効率モータ」は、スロット形状の最適化、低損失の電磁鋼板の採用などの損失低減技術によって効率規制値を満足している。高効率に加え、低騒音も実現した環境に配慮した製品である。

Motors are a key component indispensable for social and industrial activities. They consume electric power that accounts for nearly 40% of the global energy consumption. Consequently, improving motor efficiency is a challenge for the major countries of the world. In Japan, the Top Runner Program was introduced in April 2015 to regulate motor efficiency. The “Premium Efficiency Motor” that Fuji Electric has developed satisfies the efficiency regulation value through various loss-reduction technologies including an optimized slot shape and the adoption of magnetic steel that dissipates less power. This is an environmentally friendly product achieving low noise as well as high efficiency.

## ① まえがき

三相誘導電動機（モータ）<sup>〔注1〕</sup>は、社会生活や産業活動に欠かせないキーコンポーネントである。空調用ファン・コンプレッサ、送風用ファン、水道用ポンプ、エレベータなどのインフラ設備の動力源として、また、工作機械、印刷機、クレーンなどの各種産業機械の動力源として数多く使用されている。したがって、地球規模の省エネルギー（省エネ）においてモータの高効率化は不可欠である。

海外の主要国で効率の規制が進められてきているが、日本はシステムで省エネを行うことに主眼を置いてきたことからモータ単体での規制はなかった。しかし、2013年11月に「エネルギーの使用の合理化等に関する法律」（省エネ法）の改正が施行され、モータのトップランナー制度として2015年4月から効率の規制が始まることとなった。

本稿では、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」の損失低減技術について述べる。

## ② モータの電力消費量と効率クラス

電力は全世界で1年間に20兆kWh消費されており、その内の約40%がモータによって消費されている（図1）<sup>〔注1〕</sup>。

1997年には地球温暖化防止の「京都議定書」<sup>〔注2〕</sup>が議決され、温室効果ガスの排出量を削減することが世界的な約束となった。仮に、モータ効率を1%向上させれば、全世界の電力消費量を800億kWh、CO<sub>2</sub>排出量を3,200万t削減

できる。

欧米先進国をはじめとするエネルギー消費大国にとって、モータの高効率化はCO<sub>2</sub>排出量の削減に対して非常に効果的な施策と位置付けられ、モータ単体での効率向上を図る動きとなっている。効率に関する国際的な規格として、国際電気標準会議（IEC）のIEC 60034-30〔回転電気機械－第30部：単一速度三相かご形誘導電動機の効率クラス（IEコード）〕がある（表1）。米国は、高効率（IE2）とプレミアム効率（IE3）の生産出荷台数の合計が約70%となっている。欧州は、IE2が50%以上となっており、2015年1月にはIE3での法規制が始まった。

このように欧米でモータの高効率化が進んでいる状況に対し、日本もトップランナー基準による効率の規制が

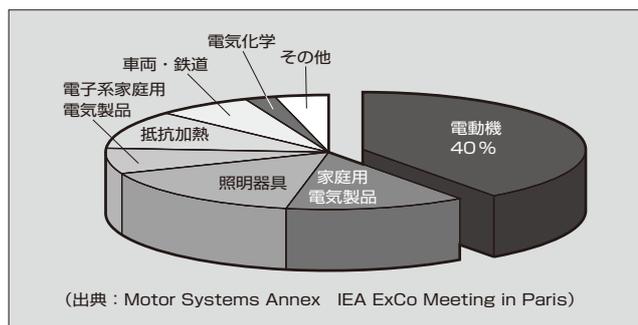


図1 全世界の電力消費量の内訳

表1 IEコードと効率クラス

IEコード	効率クラス	JIS
IE3	プレミアム効率	JIS C 4213
IE2	高効率	JIS C 4212相当
IE1	標準効率	JIS C 4210相当

〔注1〕モータ：モータは一般的には全ての電動機を指すが、本稿では三相誘導電動機を指す。

〔注2〕京都議定書：正式名称は“気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書”である。

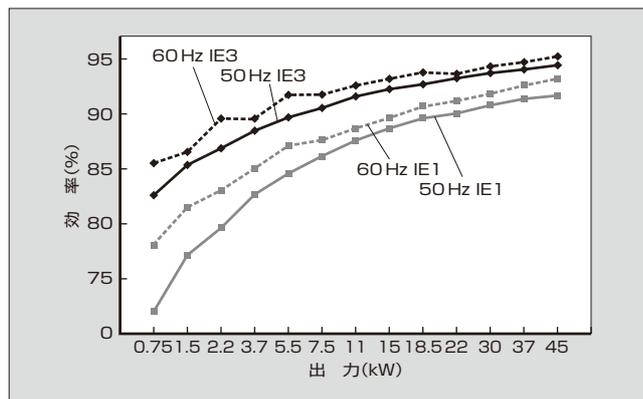


図2 富士電機の代表機種における効率比較

2015年4月に始まる。<sup>(3)</sup>

トッランナー基準はIE3をベースにしながらか日本独自の電源事情である3種類の定格電圧・周波数を考慮した規制となっている。すなわち、200V 50Hz および 220V 60Hz の効率規制値はIE3であるのに対し、200V 60Hz はIE3に係数を掛けた値を規制値とし、また、規制値の達成判定を36区分で設定している。図2に、IE1とIE3について富士電機の代表機種における効率比較を示す。

### ③ 「プレミアム効率モータ」の特徴

プレミアム効率モータの外観を図3に、仕様を表2に示す。特徴は次のとおりである。

#### (1) トッランナー基準のモータ効率

全ての出力(0.75~375kW)でトッランナー基準のモータ効率を実現している。また、定格電圧・周波数の3定格<sup>(注3)</sup>および6定格<sup>(注4)</sup>で、効率クラスIE3(プレミアム効率 JIS C 4034-30:2011)を実現している。

#### (2) 標準モータとの容易な置換え



図3 「プレミアム効率モータ」

<注3> 3定格: 200V 50Hz, 200V 60Hz, 220V 60Hzを指す。

<注4> 6定格: 200V 50Hz, 400V 50Hz, 200V 60Hz, 400V 60Hz, 220V 60Hz, 440V 60Hzを指す。6定格にするためには、3定格に対して電圧や電流の増加を考慮した設計が必要になる。

表2 「プレミアム効率モータ」の仕様

項目	仕様	
シリーズ名	MLU (鋳物フレーム100L以上) MLK (鋼板フレーム90L以下)	
保護方式	IP44 (屋内) IP55 (屋外)	
定格電圧・周波数	枠番160L以下: 200/200-220V および 400/400-440V 50/60Hz 枠番180M以上および屋外型: 200-400 50Hzおよび 200-400/220-440V 60Hz	
時間定格	S1 (連続)	
始動方式	3.7kW以下: 直入始動 5.5kW以上: スターデルタ始動	
耐熱クラス	155 (F)	
端子箱 (脚取付)	取付位置	枠番200L以下: 負荷側から見て左横側 枠番225S以上: 負荷側から見て上側
	引込口 方向	枠番200L以下: 下向き (屋内) 反運転側向き (屋外) 枠番225S以上: 負荷側から見て左向き
口出線	方式	枠番160L以下: 端子台方式 枠番180M以上および屋外型: ラグ方式
	本数	出力3.7kW以下: 3本 (屋内), 9本 (屋外) 出力5.5kW以上: 6本 (屋内), 12本 (屋外)
耐振性	6.8m/s <sup>2</sup> (0.7G)	
塗装色	マンセルN1.2 (黒ツヤなし)	
銘板 ワッペン エンブレム	仕様銘板	枠番200L以下: フレーム部へ貼付 (鋼板製) フレーム銘板取付座にくぎ止め (鋳物製) 枠番225S以上: ファンカバー部にくぎ止め
	適用	JIS C 4213
規格	効率	JIS C 4034-30:2011*
モータ効率クラス		2P-45kW以下, 4・6P-7.5kW以下 (ただし6P-1.5kWのみ除く): IE3/IE3-IE3 at 200/200-220V, 400/400-440V 50/60Hz, 二重電圧 2P-55kW以上, 4・6P-11kW以上および 6P-1.5kW: IE3/IE2-IE3 at 200/200-220V, 400/400-440V 50/60Hz, 二重電圧

\*モータ効率の試験方法は、JIS C 4034-2-1「単一速度三相かご形誘導電動機の損失及び効率の算定方法」規定の「不確かさ低」による。

<sup>(注5)</sup> 枠番号および取付寸法を、従来の富士電機の標準モータと同一とすることで、モータの円滑な置換えができる設計とした。脚取付で枠番号160M以下の機種は全長および径寸法も同一寸法とした。

#### (3) ワイド電圧

屋外型のモータにおいては汎用性を追求し、富士電機および顧客における在庫点数を削減するため、定格電圧・周波数を6定格とした。

#### (4) 耐環境性の向上

温度上昇を抑えつつも絶縁性能を上げ、また、鋳鉄フレームの採用範囲を拡大して耐食性の向上や低騒音化を進め、さまざまな環境下で使用できるようにした。

##### (a) 保護方式

従来のモータの保護等級は屋内と屋外で仕様の区別は

<注5> 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。

なく IP44 であったが、<sup>〔注6〕</sup>プレミアム効率モータにおいては世界標準に合わせて、屋内仕様を IP44、屋外仕様を IP55 とした。

(b) 周囲温度

周囲温度の仕様は、一般に -20 ~ +40℃ であったが、富士電機のプレミアム効率モータにおいては -30 ~ +50℃ に範囲を拡大した。

(c) 最大始動電流

効率を上げるために従来の標準モータより抵抗を小さくした結果、最大始動電流は大きくなったが、ロータスロット形状を見直すことで増加を 20% 程度に抑えた。

(5) インバータ運転への対応

インバータ運転の使用範囲を拡大した。60 Hz の基底周波数において、従来は 15 ~ 60 Hz の範囲で定トルク運転が可能であったが、プレミアム効率モータは 3 ~ 60 Hz で定トルク運転が可能である。より広範囲で使用できるので利便性が高まった。

4 損失低減技術

4.1 損失低減方法

図 4 にモータの損失低減策を示す。損失はモータの各部分で発生しており、効率規制値を満足するためには全ての部位の損失を低減する必要がある。また、損失は、銅損（一次銅損および二次銅損）、鉄損、機械損および漂遊負荷損に分けられ、約 50% を占める銅損と約 30% を占める鉄損の低減が重要である。

(1) 銅損の低減

一次銅損とは、モータ巻線の電気抵抗と電流によるジュール損失のことであり、電流が一定の場合は抵抗に比例して増加する。抵抗を小さくするために、固定子スロットの数および形状の最適化を行い、従来品と比較してスロットの形状を大きくすることや、導体の断面積を増やすことなどの見直しを行った。式(1)で示すように、抵抗と導体断面積は反比例の関係であるため、導体の断面積を増やすことで抵抗を下げ損失を低減している。

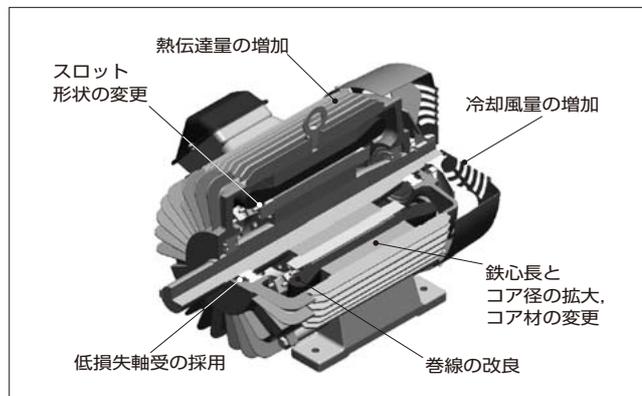


図 4 モータの損失低減策

〔注6〕 IP : 77 ページ「解説 4」を参照のこと

$$R = \rho \frac{L}{S} \dots\dots\dots (1)$$

- R : 抵抗 (Ω)
- ρ : 電気抵抗率 (Ω・m)
- L : 導体長さ (m)
- S : 導体断面積 (m<sup>2</sup>)

スロット数および形状は、有限要素法を用いて検討し、固定子と回転子の磁束分布と発生する損失とのバランスを考慮して最適なものに決定した。その他、スロットに入れる巻線の充填率を向上させることによる導体断面積の増加、およびコイルエンド部分を短く成形することによる導体長の短縮により、巻線での抵抗を小さくして一次銅損を低減している。

回転子側で発生する二次銅損は、アルミニウムや銅などの二次側導体に誘導電流が流れることで発生する損失である。一次銅損と同様にスロット形状の最適化を行い、抵抗を小さくして二次銅損を低減している。また、回転子スロットの形状によってモータのトルク特性および電流特性が大きく変わるため、各特性を満足させながら効率を満足させるために、モータの出力や極数ごとに形状を最適化した。

(2) 鉄損の低減

鉄損は、鉄心内の磁束の変化によって発生する渦電流損とヒステリシス損の和である。材料自体の鉄損を減少させるために低損失な電磁鋼板を採用した。

鉄心各部に応力が加わることで材料の磁気特性にひずみが生じて損失が増加するため、応力を緩和させることも重要である。例えば、コアとフレームのしめしろを小さく見直すことでコアの変形を最小限に抑え、損失の増加を防いでいる。従来のモータでは電磁鋼板を積層する際にコアの背面を溶接しているが、溶接によりコアの応力が増加し鉄損が増えることが想定された。そこで、コア積方式を溶接しない方法に変更して鉄損の増加を防いだ。

鉄損を低減するためには、固定子と回転子の溝数（スロットコンビ）やスロット形状・寸法など多くのパラメータを考慮する必要がある。銅損を低減するためにスロットを大きくしていくとモータの磁束密度が高くなり、鉄損が増加して効率が低下していく。したがって、銅損とのバランスや電気特性を考慮しながら鉄損を低減する必要があるため、独自に作成した計算プログラムでおおよその仕様を



図 5 固定子鉄心の断面（部分）

決め、電磁界解析によって設計精度を上げて最適化を図った。

固定子鉄心(図5)の電磁界解析について述べる。図6に鉄心の磁束密度分布の例を示す。回転中のある時点での磁束密度を表したものである。また、図7に鉄心の鉄損密度分布の例を示す。電圧が正弦波状に1周期変化したときの鉄損密度の平均を表したものである。

図6では、スロットを大きくすることで局所的に磁束密度が高くなることが予想されたが、全体的に1.4~1.6T(緑~黄色)程度であり、図内の丸印で示す磁束密度の高い部分においても、磁束密度が飽和せず従来品と同程度であることが分かった。図7では、図6の磁束密度の高い部分においても鉄損は増加しておらず、銅損と鉄損のバランスが取れたスロット形状であることが確認できた。

### (3) 機械損の低減

モータには外被冷却用のファンがあり、その回転によって発生する風損も機械損に含まれる。そこで、トッランナーモータは従来のモータよりも損失が少なく発熱による温度上昇が低くなることを踏まえ、設計段階で熱流体回路網法を採用した熱設計を行ってモータの温度を高精度に算出し、冷却ファンによる風損が最小となるようにした。な

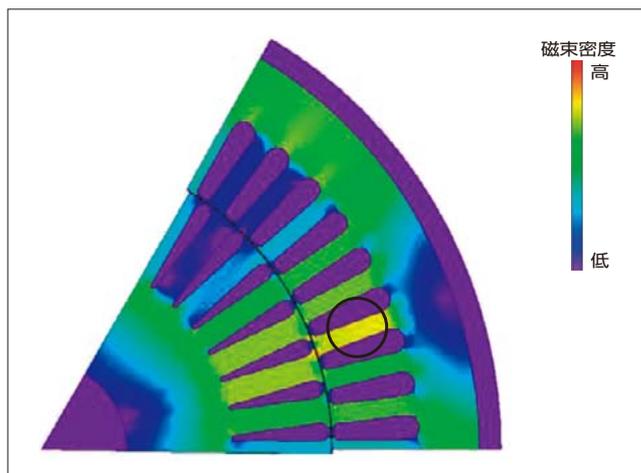


図6 鉄心の磁束密度分布の例

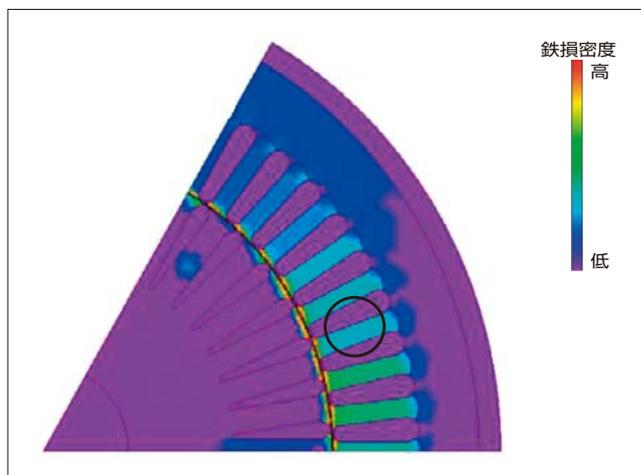


図7 鉄心の鉄損密度分布の例

お、熱流体回路網法は、流体回路網計算で風速を算出した後、熱回路網計算で各部の温度を算出する方法である。

また、モータの軸受で発生する損失も機械損に含まれるため、軸受サイズの見直しや使用するグリースの改善を行い、機械損をさらに低減させた。

### (4) 効率の製品間ばらつき低減

トッランナー基準では、規制値の達成判定を36区分で設定しており、区分ごとの加重平均で効率値を満足する必要がある。このため、効率の製品間のばらつきを小さく抑えることも重要であり、製造時における加工精度や管理を厳しくすることで、ばらつきを抑えている。

## 4.2 損失低減における今後の課題

今後、効率規制値が引き上げられることを想定し、さらなる損失低減を進めていく必要がある。

4.1節で述べたように、モータで発生する損失は、銅損、鉄損、機械損および漂遊負荷損に分けられる。これらの損失は互いにトレードオフの関係になっており、どれか一つの損失を大きく減らすとその他の損失が増えてしまうため、全てをバランス良く低減していかなければならない。損失を低減してIE1からIE3まで改善するためには、損失を20~40%程度減らす必要がある。今後さらに損失を低減して効率を改善していくためには、漂遊負荷損を低減していく必要がある。

漂遊負荷損の主な要因は次の二つである。

- (a) 固定子スロットの漏れ磁束によって固定子巻線中に生じる渦電流損
- (b) エアギャップ部の高調波磁束による損失

漂遊負荷損は正確な算定が困難であり、通常は、銅損、鉄損、機械損のいずれにも含まれない損失と捉えられている。出力の小さい機種では漂遊負荷損の割合が小さく無視できるが、出力の大きい機種ではその割合が大きく損失増加の要因となっている。漂遊負荷損を低減していくためには、損失の発生原因を明確にし、設計段階で損失を精度良く算定できる手法を取り入れる必要がある。

また、高効率のモータでは、始動時のトルク特性や電流特性が悪くなる傾向にある。「MLU・MLKシリーズ」では損失の低減と始動特性を両立できるようなスロット形状の最適化を行っているが、さらに損失を低減していくと両立は困難になっていくと考えられる。さらなる損失低減のため、形状の変更などの検討と並行して新たな低損失コア材料の検討が必要である。また、電磁鋼板をプレス型で打ち抜く際に発生する打ち抜きひずみによって材料の鉄損が増加するので、ひずみ取りの検討も必要である。

## 5 あとがき

富士電機のトッランナーモータである「プレミアム効率モータ」の損失低減技術について述べた。日本を含む主要な国々で効率の規制がかけられており、富士電機は、この規制を満足する高効率モータを実現するための開発を進

めてきた。

今後も、温室効果ガス削減のための省エネルギー・省電力がモータには要求されていくと考えられる。さらなる高効率化に向け、引き続き開発を進めていく所存である。

#### 参考文献

- (1) 総務省統計局. “石炭・石油・天然ガス・電力消費量 (2008年)”. 世界の統計2012.
- (2) Rolamd Brüniger. Motor Systems Annex IEA ExCo Meeting in Paris 14/15 April 2008.
- (3) 日本電機工業会高効率モータ普及委員会. “トップランナーモータ”. 省エネルギー. 2013, vol.65, no.5.
- (4) 富井栄一, 宇津野良. 高効率モータの技術解説. 工業加熱. 2015, vol.52, no.1, p.27-33.



#### 舘 憲弘

電動機およびその応用製品の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部鈴鹿工場回転機設計部課長。



#### 鯉淵 博文

電動機の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部鈴鹿工場回転機設計部課長補佐。



#### 高橋 和利

電動機、特に三相誘導電動機の開発と設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部鈴鹿工場回転機設計部。



# インバーター一体型モータ

## Inverter-Integrated Motor

宇津野 良 UTSUNO, Makoto

松井 康平 MATSUI, Kohei

近年、電動機（モータ）の高効率化や可変速システムによる省エネルギー化が加速している。富士電機は、モータにインバータ機能を内蔵したインバーター一体型モータを開発した。モータ単体が高効率であるだけでなく、インバータ制御による可変速運転を組み合わせることで大幅な省エネルギー効果が得られ、また一体化による小型化も実現している。省エネルギー効果は、効率クラス IE1 の標準モータに対して 45% 低減（1,923 kWh/年）、IE3 の「プレミアム効率モータ」に対して 43% 低減（1,742 kWh/年）となった。

Recently, energy saving by improving motor efficiency and adopting variable speed control systems have come to be accelerated. Fuji Electric has developed an inverter-integrated motor, which incorporates inverter functions into a motor. In addition to adopting a high efficient motor, variable speed operation with inverter control achieves significant energy saving effect. Moreover, it achieves downsizing by the incorporation. The energy-saving effect amounts to a reduction of 45% (1,923 kWh per year) from standard motors with IE1 class efficiency and 43% (1,742 kWh per year) compared to IE3 "Premium Efficiency Motors."

### 1 まえがき

地球温暖化防止を背景として電動機（モータ）の高効率化やシステムの省エネルギー（省エネ）化が加速している。空調機分野では、可変速運転により省エネを行うためインバータ搭載機が増加している<sup>(1),(2)</sup>。富士電機は、モータとインバータについて多種多様なシリーズを提供しており、これらを組み合わせてさまざまなシステムに対応している。

今回、省エネだけでなく、小型・省スペース化や取付け工事の短縮などの要求が増加していることを踏まえ、モータにインバータの機能を内蔵したインバーター一体型モータを開発した。

### 2 省エネルギー化の要求

#### 2.1 モータの消費電力量の現状<sup>(3),(4)</sup>

日本における家庭用・業務用・産業用を合わせたモータの普及台数は約 1 億台とされている。これらのモータによ

る年間消費電力量は、国内の全消費電力量の約 55% を占める。産業部門に限った産業用モータの年間消費電力量は、産業部門の約 75% を占めている（図 1）。モータの消費電力量が半数以上を占めており、モータの省エネ化が求められている。

#### 2.2 可変速運転による省エネルギー

一般的にファンの風量やポンプの流量は、ダンパやバルブを使って調整されている。しかし、このような調整方法では、風量や流量を下げてモータの軸動力の大幅な低減は期待できない。そこで、インバータを用いた回転速度による制御を行うと、電力は回転速度の 3 乗に比例するので大幅な省エネを図ることができる。図 2 に風量と所要動力の関係の例を示す。インバータ制御において、特に、風量が少ない場合に大きい省エネ効果が得られる。ファンなどの空調用途では、必要風量に合わせて回転速度を制御することで省エネを図ることができる。

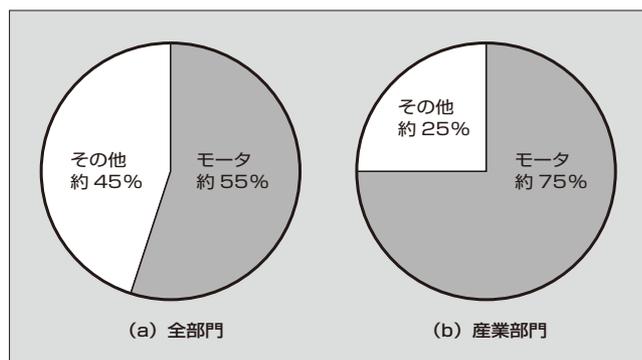


図 1 国内の年間消費電力量におけるモータの占める割合

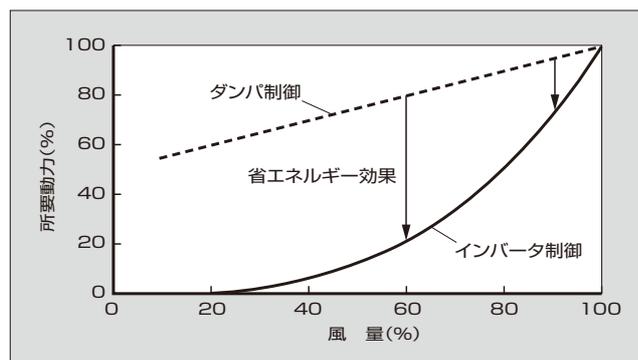


図 2 風量と所要動力の関係の例

### 3 開発機の仕様と構造

#### 3.1 開発機の仕様

開発機の仕様を表1に示す。回転速度の範囲を50～1,000 r/minとし、モータ単体の効率は、IEC 60034-30-1で規定されているスーパープレミアム効率と呼ばれる効率クラスIE4以上の高効率を実現している。また、インバータの性能や機能は、富士電機の「FRENIC-Mini (C2S)」と同等である。開発機は、モータ単体で高効率であるだけでなくインバータ制御による可変速運転を組み合わせることで、大幅な省エネが可能である。

#### 3.2 開発機の構造

図3に開発機の外観を示す。モータフレームにインバータの機能を内蔵している。空調機器のファンを駆動する用途を前提とし、ファンの冷却風を利用してインバーター一体型モータを冷却する構造とした。また、冷却能力を向上させるため、アルミニウムフレームを採用した。インバータを格納するフレーム部において、特にフレームの内側で電子部品の発熱が大きい箇所では冷却面積を十分に確保しつつ、風の流れの抵抗が大きくなる構造とした。モータ単体効率が効率クラスIE4と高いことと、出力やトルクの大きさ、定出力運転範囲がないことなどの観点から、フェライト磁石を採用した永久磁石式同期モータとした。また、インバータ出力部とモータ入力部の間隔が短くなる

表1 インバーター一体型モータ（開発機）の仕様

項目	仕様
定格出力	1 kW
定格回転速度	1,000 r/min
入力電圧	3φ, 200 V級
効率	84.1%以上（モータ単体） （IEC 60034-30-1規定のクラスIE4）
温度範囲	-20～+60℃
インバータ性能	FRENIC-Mini (C2S) 相当
耐振動	1 G, 10-150-10Hz×20サイクル 1オクターブ/分, X-Y-Zの3方向



図3 インバーター一体型モータ（開発機）

ことで、配線定数に起因するマイクロサージ電圧による絶縁劣化を低減することが可能な構造である。

### 4 試験結果

#### 4.1 効率測定

ファンを取り付けた状態でトルク-効率特性試験を行うことは困難であるため、インバーター一体型モータのシャフトを、負荷機として使用するモータにカップリングを介して接続し、冷時状態で測定した。図4に、回転速度を1,000 r/minの一定条件における負荷特性を示す。定格トルク9.55 N・mでは、モータ単体の要求効率84.1%よりも高い実測効率86.3%が得られた。

#### 4.2 実負荷温度試験

図5に実負荷試験装置を示す。簡易風洞装置を作製し、その中に装置を取めて試験を行った。流量、静圧、インバーター一体型モータの各部の温度は、それぞれ流量計、圧力計、熱電対を使って測定した。

図6に、定格負荷時の各部品の温度の実測値と熱流体解析による解析値を示す。同図の横軸（a～l）はインバータ基板を含めた各部品である。図から次のことが分かった。

- (a) 各部品の温度の解析値は、実測値とおおむね一致し、温度上昇の誤差は平均で17%である。
  - (b) 部品の温度は許容値以下である。
- 特に部品gなどの実測値と解析値の誤差が大きい部品

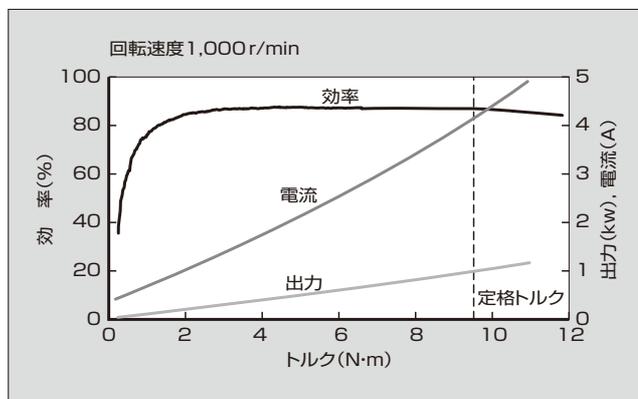


図4 負荷特性（モータ単体）

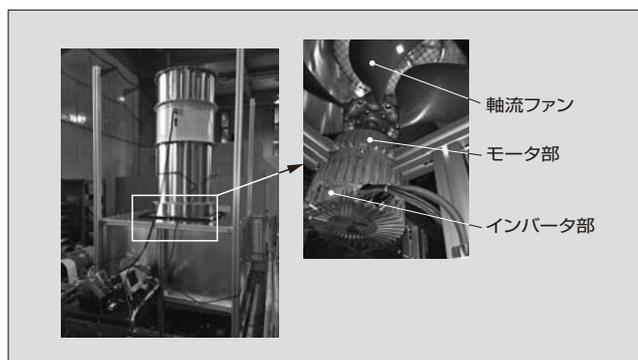


図5 実負荷試験装置

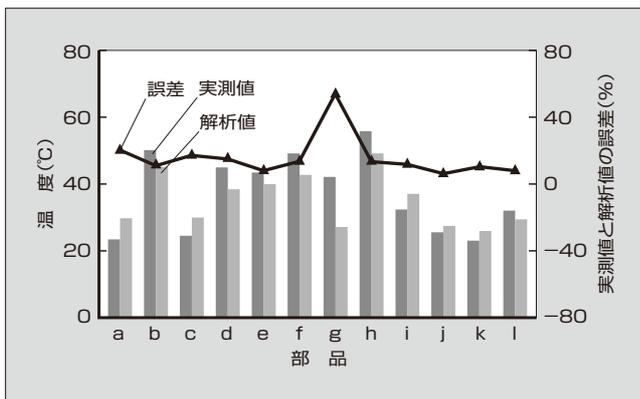


図6 定格負荷時の各部品の温度実測値と解析値

は、近傍に配置されている他の部品の発熱による影響を受けていると考えられ、インバーター一体型モータのフレームを流れる冷却風の剥離による冷却能力の低下など、解析精度向上のための検討項目が得られた。

### 4.3 耐振動試験

ガスヒートポンプなどの空調用室外機は、装置内部にコンプレッサやエンジンが組み込まれている。これらの機器の振動により、同じ装置に組み込まれるモータにも振動が加わる。そこで過去の実績を基に耐振動試験を行い、試験後にインバーター一体型モータの各部に損傷がないことを確認した。

インバータの各部品の固有振動数（共振周波数）を測定するため、インバータ基板単体での打撃試験と、これに合わせて基板単体のモーダル解析を解析ツール ANSYS Workbench<sup>(注)</sup> を用いて行い、実測と比較した。図7に、インバータ基板の固有振動数の実測値と解析値を示す。横軸（A～D）はインバータ基板を含む各部品である。実測値と解析値の誤差は最大5%であり、精度は良好であった。しかし、開発仕様の耐振動の周波数範囲である10～150 Hzの間で一部の部品が固有振動数を持っていることが判明した。この周波数の範囲は、空調機器内のエンジン

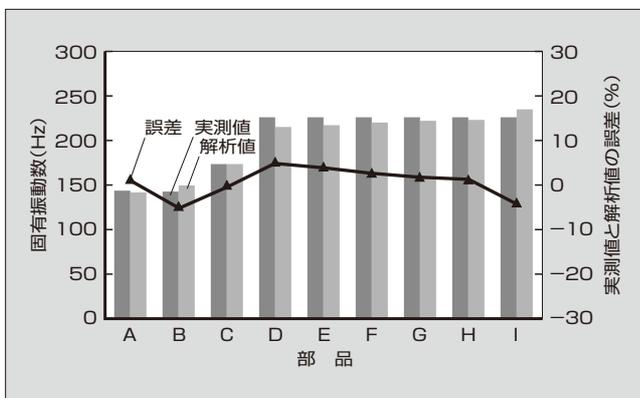


図7 インバータ基板の固有振動数の実測値と解析値

〈注〉 ANSYS Workbench : ANSYS Inc. および ANSYS Inc. 子会社の商標または登録商標

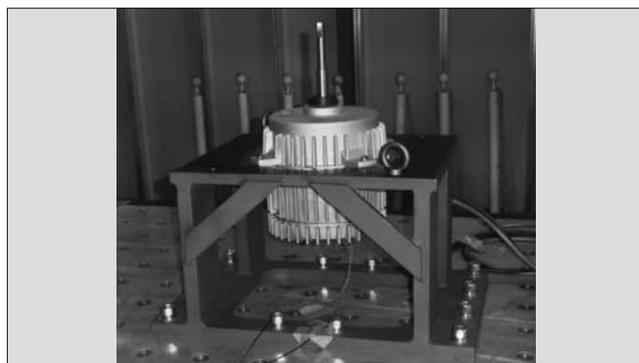


図8 耐振動試験の状況

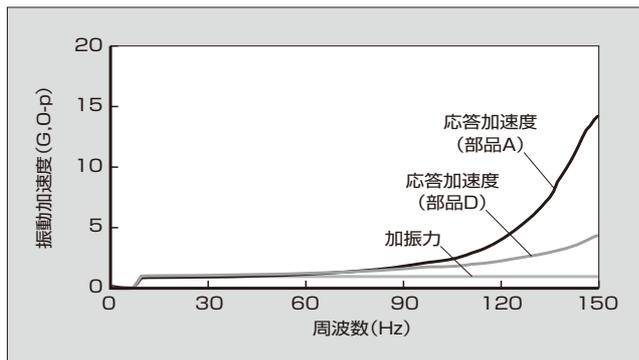


図9 部品AとDの振動加速度の周波数特性（Y方向）の例

やコンプレッサによる振動の周波数帯である。開発仕様の振動を受けても、実用上支障を来さないように、加振試験時に特に注視すべき部品であることをつかんだ。

図8に耐振動試験の状況を示す。試験において、インバーター一体型モータを固定する治具は、ANSYS Workbenchによる固有値解析において固有値が200 Hz以上であり、治具による影響がないことを確認している。

図9に、部品AとDの振動加速度の周波数特性（Y方向）の例を示す。150 Hz以下での共振は見られず、開発仕様を満足した。加振試験後にインバーター一体型モータを分解し、部品を含めて不具合は生じていないことを確認している。

## 5 省エネルギー効果と小型化

### 5.1 省エネルギー効果

インバーター一体型モータについて、標準モータ（効率クラスIE1）と2015年4月から始まる効率規制に対応したトップランナーモータ「プレミアム効率モータ」（効率クラスIE3）を比較対象として省エネ効果を検証する。省エネ効果の例として、図10に省エネルギー効果の例を示す。年間の消費電力量の比較と各機種における電力量料金を示している。

消費電力量と電力量料金は次の条件により算出している。

#### (1) 機種

- 標準モータ：MLC1107B, 1.5 kW, 6極
- プレミアム効率モータ：MLU1107B, 1.5 kW, 6極

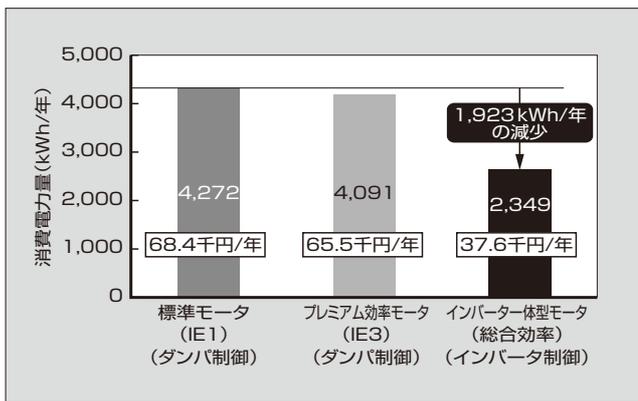


図10 省エネルギー効果の例

- インバーター体型モータ：1.5kW，1,000r/min
- (2) 条件
  - 1日10時間運転，年間250日稼動，風量80%
  - 電力量料金単価16円/kWh〔一般社団法人日本電機工業会（JEMA）においてトップランナーモータの省エネ効果の算出に用いられる単価〕
  - 標準モータ，プレミアム効率モータ：ダンパ制御  
インバーター体型モータ：インバータ制御（図2に示した風量と所要動力との関係を用いて算出）

図10から、インバーター体型モータによる省エネ効果は、標準モータに対して45%低減（1,923kWh/年）、プレミアム効率モータに対して43%低減（1,742kWh/年）となる。また電力量料金は、標準モータに対して30,772円/年、プ

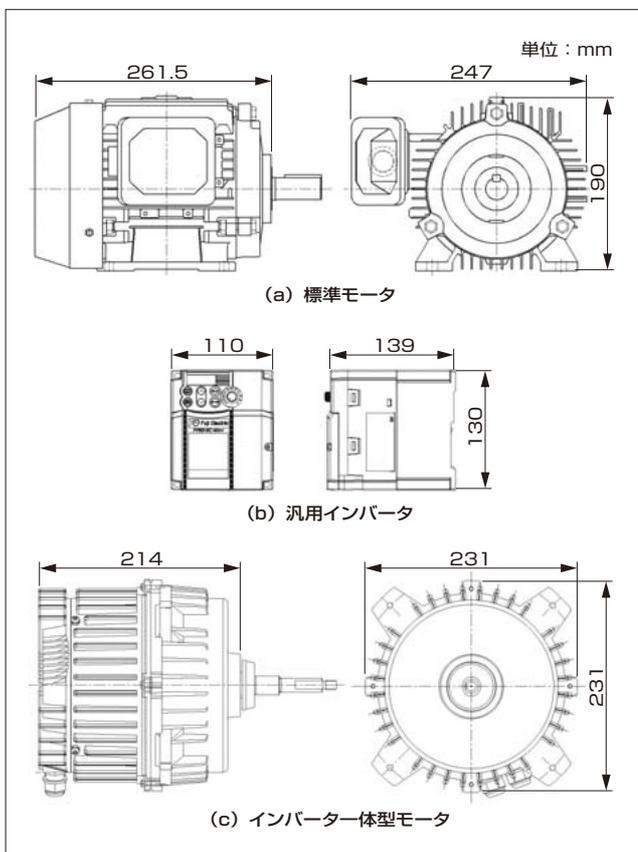


図11 各機種の外形

表2 体積と質量の比較

機種	体積と質量
標準モータ MLC1097B 1.5kW，4極	体積：12.27×10 <sup>6</sup> mm <sup>3</sup> 質量：16.5kg
汎用インバータ FRN1.5C2S-2J	体積：1.99×10 <sup>6</sup> mm <sup>3</sup> 質量：1.7kg
インバーター体型モータ	体積：11.42×10 <sup>6</sup> mm <sup>3</sup> 標準モータ単独との比較：-7% 標準モータ+汎用インバータとの比較：-20% 質量：12.5kg 標準モータ単独との比較：-24% 標準モータ+汎用インバータとの比較：-31%

レミアム効率モータに対して27,872円/年の低減効果が得られる。

### 5.2 小型化

標準モータ，汎用インバータ，インバーター体型モータについて、図11に各機種の外形図を、表2に体積と質量の比較を示す。インバーター体型モータと標準モータのトルクは同等である。標準モータに対してインバーター体型モータは、体積は7%減，質量は24%軽量化した。また、標準モータと汎用インバータを組み合わせた可変速システムとの比較では、体積は20%減，質量は31%軽量化した。

これまで述べてきたインバーター体型モータとしての効率特性，温度，耐振動の評価以外に，インバータ基板単体の駆動評価，および汎用インバータとの比較を行い，駆動性能や高調波のレベルなどが同等の性能であることを確認した。

### 6 あとがき

モータにインバータ機能を内蔵したインバーター体型モータについて述べた。今後，インバータ・ドライブ技術と回転機技術の融合により，さらなる高効率・省エネルギー化，小型・軽量化を目指して開発を進め，地球温暖化防止に貢献していく所存である。

### 参考文献

- (1) 花田雄一，村山大. オフィスビル空調の省エネ化リニューアル技術. 東芝レビュー. 2010, vol.65, no.5, p.27-30.
- (2) 一般社団法人日本電機工業会. INVERTER2015 伸びゆくインバータ. JEMAパンフレット. 2015.
- (3) 一般社団法人日本電機工業会. 地球環境保護・省エネルギーのために“トップランナーモータ”2015年度の基準達成に向けて. JEMAパンフレット. 2013.
- (4) 財団法人 エネルギー総合工学研究所. 平成21年度省エネルギー設備導入促進指導事業（エネルギー消費機器実態等調査事業）報告書.（資源エネルギー庁委託事業）. IAE-0919107, 2010.



**宇津野 良**

回転機的设计開発を経て事業企画に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレクトロニクス事業本部回転機事業部管理部主任。電気学会会員，日本磁気学会会員。博士（工学）。



**松井 康平**

パワーエレクトロニクス機器の研究開発に従事。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ーエレクトロニクス技術開発センター電機制御技術開発部主任。博士（工学）。



# 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

Technologies to Reduce Size and Weight of Power Electronics Equipment for Rolling Stock

滝沢 将光 TAKIZAWA, Masamitsu

西嶋 与貴 NISHIJIMA, Tomotaka

近年、鉄道車両に取り付けられる機器や装置に搭載するパワーエレクトロニクス（パワエレ）機器には、省エネルギーだけでなく小型・軽量化が強く求められている。富士電機は、冷却技術・機器実装技術の向上により、これらの要求に応えてきた。また、小型化に限界があった絶縁トランスにおいては、高周波絶縁回路技術と直流給電方式の採用、および最適設計を行うことにより、装置に対する占有率が減少し、さらなる小型・軽量化を実現した。新幹線などの鉄道車両用プロパルジョンシステムや補助電源装置など、最新の技術を用いたパワエレ機器を国内外に提供している。

Recently, there have been strong demands for power electronics equipment mounted on devices and units to be installed in rolling stock to have a smaller size, less weight and also to save energy. Fuji Electric has been meeting these demands by improving its cooling and equipment mounting technologies. For isolation transformers, which had limitations in terms of their downsizing, we have adopted a high-frequency isolation circuit technology and direct current power supply system and implemented an optimized design to reduce the ratio of their installation space to the unit volume, thereby realizing further size and weight reduction. We offer in Japan and overseas power electronics equipment that uses the latest technologies such as propulsion systems and auxiliary power supplies for rolling stock including the Shinkansen.

## ① まえがき

近年、鉄道車両において乗客サービスや車両機能を向上するために取り付けられる機器や装置に搭載するパワーエレクトロニクス（パワエレ）機器には、省エネルギー（省エネ）だけでなく小型・軽量化が強く求められる。このような要求に応えるため、富士電機は、冷却技術・機器実装技術の向上、ならびに高周波絶縁回路技術の採用と最適設計を行っている。本稿では、東海旅客鉄道株式会社（JR東海）向け新幹線電車用主変換装置と、北海道旅客鉄道株式会社（JR北海道）向け車両補助電源装置を例に、パワエレ機器の小型・軽量化技術について述べる。

## ② 鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器

鉄道車両におけるパワエレ機器（図1）への要求項目は、省エネ、環境への調和など社会の要求によるものから、安全性、信頼性など公共交通機関として必然的なもの、低価

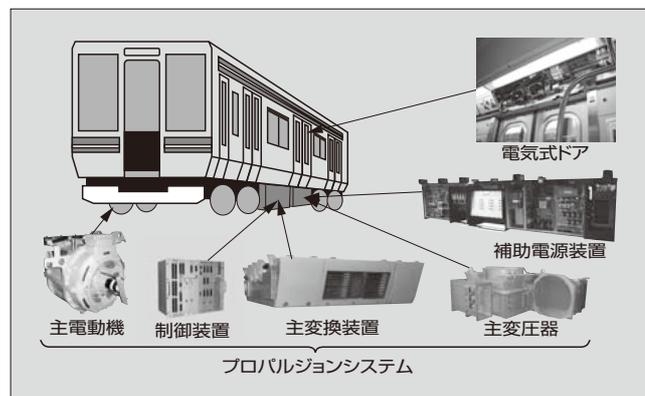


図1 鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器

格、高出力、小型・軽量、省メンテナンス、低騒音、制御性能の向上など鉄道会社が求めるものまで、多岐にわたる。

富士電機は、鉄道車両用プロパルジョンシステム（駆動システム：主電動機、制御装置、主変換装置、主変圧器）、補助電源装置、電気式ドア（側引戸用戸閉装置）において次世代技術の開発に取り組んでいる。特に新幹線電車用プロパルジョンシステムでは、初代の0系新幹線電車から最新のN700A新幹線電車まで継続して採用され、歴代の新幹線電車用プロパルジョンシステムを納入してきた。信頼性と安全性が高く、実績のある製品として国内で高い評価を得ている。さらに、在来線車両用プロパルジョンシステムや補助電源装置においても、1950年代から国内外において納入してきた。

## ③ 小型・軽量化技術

鉄道車両用プロパルジョンシステムと補助電源装置の小型・軽量化技術について述べる。

### 3.1 新幹線電車向け主変換装置における冷却性能の向上

JR東海の新幹線電車の最新車両であるN700A新幹線電車（図2）の主変換装置における冷却技術・機器実装技術について概説する。

主変換装置は、図3に示すように3レベルPWM（パルス幅変調）コンバータと3レベルVVVF（可変電圧可変周波数）インバータで構成している。並列に接続した4台の主電動機を、1台のVVVFインバータで一括して駆動する。高耐圧、大容量かつ低損失のIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュール（3,300V、1,200A）を搭載した低損失のスナバ回路レス方式を採用して高効率化と軽量化を図っている。

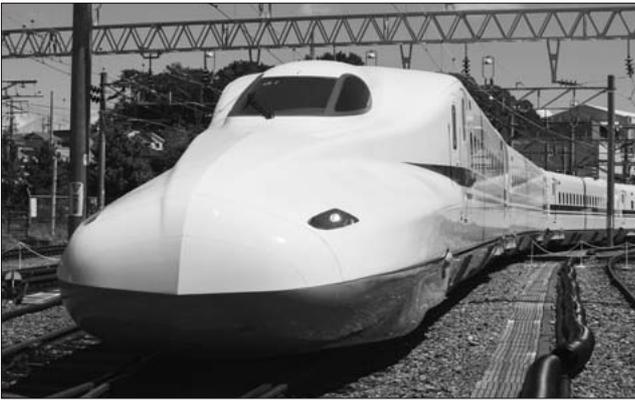


図2 N700A 新幹線電車 (写真提供: 東海旅客鉄道株式会社)

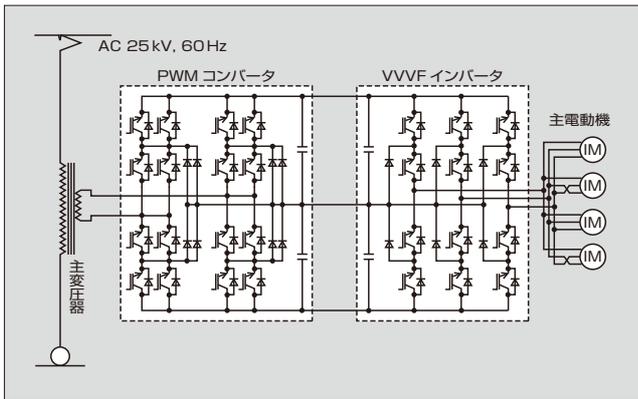


図3 N700A 新幹線電車主変換装置の構成

表1に、新幹線電車向け主変換装置の比較を示す。2007年に営業運転を開始したN700系新幹線電車向けのTCI3形主変換装置は、スナバ回路の省略や構造の最適化などにより、300系新幹線電車のTCI1形に比べて質量で43%の軽量化、体積で22%の小型化を実現している。冷却方式は、300系・700系新幹線電車と同一方式である冷媒を用いた沸騰冷却とブロワによる強制風冷の組合せを採用している。

2008年から営業運転を開始したN700系新幹線電車向けのTCI100形主変換装置は、冷却方式に冷媒やブロワを用いずに、シンプルなアルミニウム冷却フィンと、電車が走行することにより生じる風を冷却風として積極的に利用する走行風自冷方式を利用したブロワレス方式を採用している。これにより、TCI3形主変換装置と同じ外形でありながら、質量は12% (300系比-50%) 軽量化している。ブ

ロワレス化により客室内の騒音が低減し、居住性が向上している。

2013年から営業運転を開始したN700A新幹線電車向けTCI101形主変換装置は、TCI100形主変換装置と同一の冷却方式であるブロワレス方式を引き続き採用し、さらに体積は25% (300系比-42%) の小型化、質量は17% (300系比-59%) の軽量化を実現している。小型・軽量化に当たっては充電回路などの補助回路方式を顧客と共同で検討するとともに、電気品の仕様の見直しやアルミニウム冷却フィンの材質を変更することなどにより実現した。

今後、N700A新幹線電車向けにおいても、主変換装置のさらなる小型・軽量化を進めた製品を提案し開発していく。

### 3.2 高周波絶縁回路技術の採用と最適設計

#### (1) 商用周波数絶縁方式 (従来方式) の課題

補助電源装置は、架線の電圧 (600 ~ 825 V) を一般の機器が扱える電圧に変換するものである。安全性のために架線側と負荷側を絶縁する必要があり、これまではインバータにより商用周波数の交流電圧に変換した後、トランスにより絶縁する方法が一般的であった (図4)。

しかし、昨今の技術の進歩に合わせてパワーユニットや制御装置が小型化するのに対し、商用周波数のトランスは小型化に限界があった。

図5に、ワシントン首都交通局向け補助電源装置の外観を示す。本装置も部品の配置を工夫し、過去の同等機能の製品と比べて小型化した。トランスの占有率は上昇している (図6)。

#### (2) 高周波絶縁方式と直流給電方式の適用

トランスの占有率を削減し、補助電源装置のさらなる小

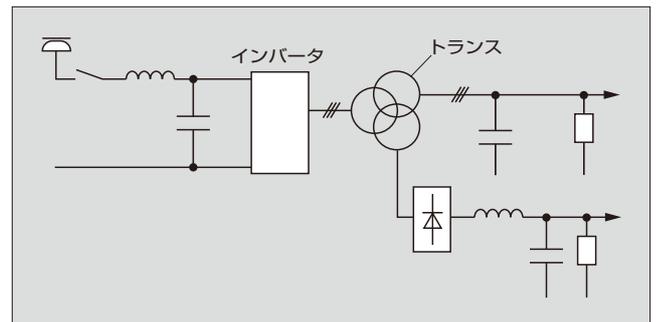


図4 一般的な補助電源装置の構成

表1 新幹線電車向け主変換装置

新幹線電車	300系	700系	N700系	N700系	N700 A
主変換装置					
	TCI1形	TCI2A形	TCI3形	TCI100形	TCI101形
体積比 (%)	100	82	78	78	58
質量比 (%)	100	74	57	50	41

型化のため、次の技術開発を進めた。

- (a) 高周波絶縁回路技術（約 10 kHz）
- (b) 直流給電方式



図5 ワシントン首都交通局向け補助電源装置

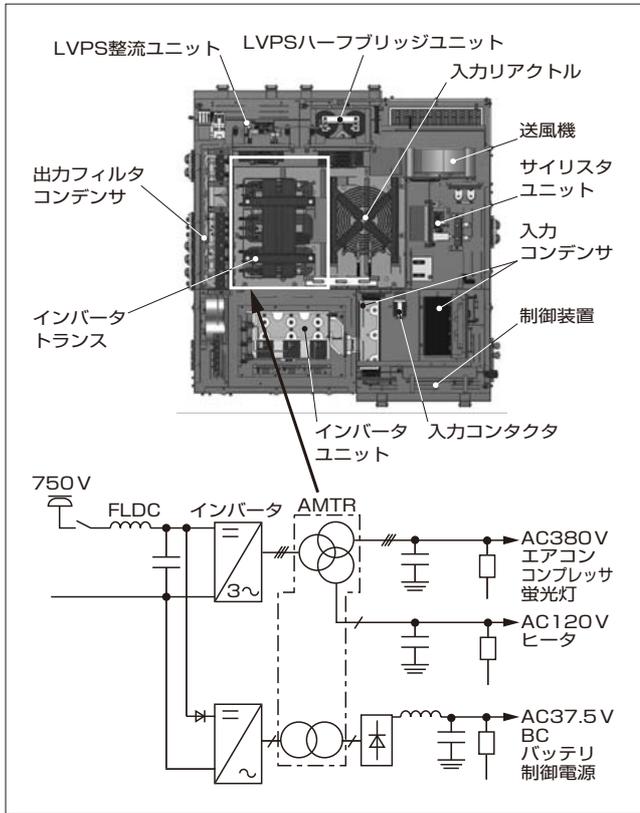


図6 ワシントン首都交通局向け補助電源装置の構成

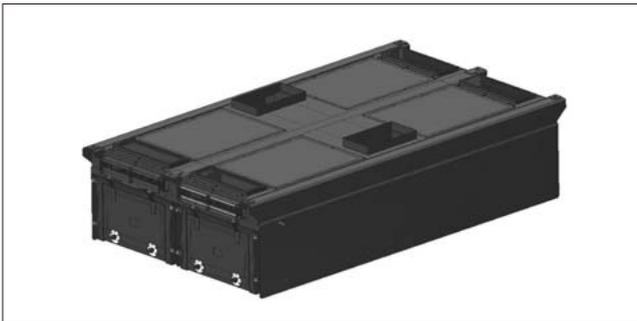


図7 北海道旅客鉄道株式会社向け補助電源装置

これらの小型・軽量化技術を確立した装置が、JR北海道向けに開発した補助電源装置である（図7）。

図8に示すように、インバータで直流を高周波交流に変換し、高周波トランスで絶縁した後、ダイオードブリッジで整流する高周波絶縁回路方式を採用している。高周波化により、トランスは磁束密度の低下による鉄心の小型化とコイル巻き数の減少による小型化、インバータは共振型回路の適用による小型化が可能となる。このように大幅な小型・軽量化（従来比75%減）を行った結果、トランスの占有率を5%まで減少できた。

また、これまでは補助電源装置の負荷となるインバータエアコンなどの負荷装置に対し、商用周波数の交流電圧で給電することが一般的だったが、JR北海道と連携して負荷装置の仕様を変更し、直流給電方式を採用した（図9）。この結果、補助電源装置の交流出力回路（インバータ回

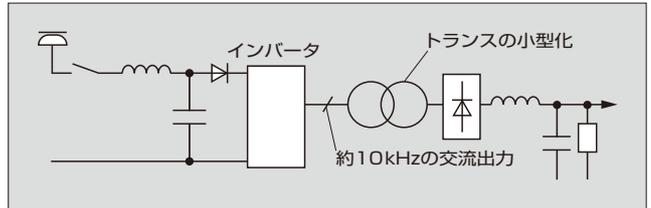


図8 高周波絶縁回路方式

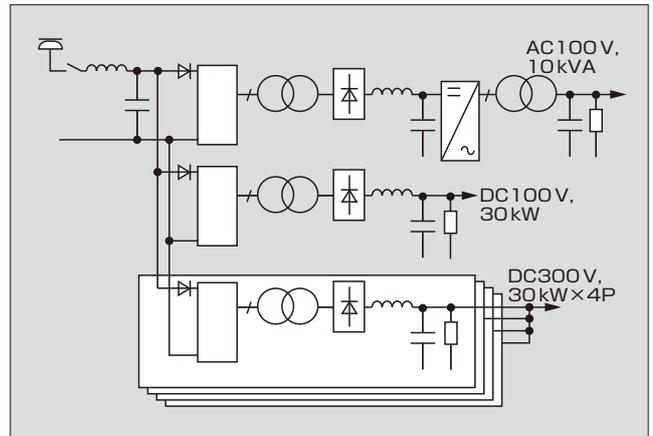


図9 直流給電方式における高周波補助電源装置の構成

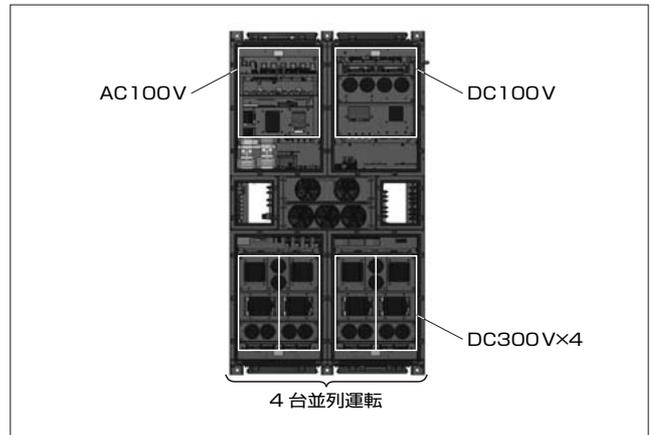


図10 高周波補助電源装置

路)だけでなく負荷装置の整流回路を削減することにもつながり、補助電源装置の小型化とともに、鉄道車両全体の軽量化にも貢献している。

高周波絶縁回路方式は、比較的小容量の装置に適している。このため、本装置では30kWの容量で最適設計された小型の装置を4台並列に接続することで、従来よりも小型・軽量で大容量の装置を実現している(図10)。補助電源装置は、鉄道車両の給電システムに応じてさまざまな出力仕様に対応する必要があるが、本装置は並列数を変えるだけで対応可能である。

#### 4 あとがき

鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器の小型・軽量化技術について述べた。これらの分野は、最先端のパワーエレクトロニクス技術をベースとして、小型・軽量、高性能、高機能、省メンテナンス、快適性などに加えて、地球環境保護への貢献という社会的テーマへの対応がますます重要になる。

今後も、省エネルギーと環境保護といった社会・市場

ニーズを先取りした研究開発を積極的に推進し、社会全体の環境負荷低減に貢献できる製品を提供していく所存である。

#### 参考文献

- (1) 井上亮二, 大庭政利. 鉄道車両におけるパワーエレクトロニクス技術. 富士時報. 2007, vol.80, no.2, p.153-161.



#### 滝沢 将光

鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器の製品開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部神戸工場パワエレ設計部主査。電気学会会員。



#### 西嶋 与貴

鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器の製品開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部神戸工場パワエレ設計部課長補佐。



# 鉄道車両用ドアの最新動向と安全・信頼性技術

Latest Trend and Safety and Reliability Technology of Rolling Stock Doors

梅澤 幸太郎 UMEZAWA, Kotaro

寺崎 富雄 TERASAKI, Tomio

稲玉 繁樹 INATAMA, Shigeki

富士電機は、鉄道車両用ドアにおいて、モータの運動方向を側引戸の直線動作に適用して機構を簡素化した戸閉装置（リニアモータ方式、FCPM方式）を開発し、製品化している。鉄道車両用ドアは、乗客の乗降や走行中の安全を確保するとともに、鉄道の定時運行にも関わる重要な装置である。このため、安全性、信頼性、機能的が高く、また、省メンテナンスであることが求められている。故障モード影響解析や危険分析などによる設計時の安全性の評価をはじめ、3重フィードバック制御、外力抑制制御、押し返し制御などの制御技術などにより、これらを実現している。

Fuji Electric has developed and commercialized a door operating equipment (linear motor system and FCPM system) with a simplified mechanism by applying the motion direction of a motor to the linear motion of the side sliding door. The door operating equipment for the side sliding door of rolling stock is an important component that ensures the safety of passengers when they are boarding, alighting and traveling, and it may affect trains' punctuality. Consequently, the system is required to be safe, reliable, high functional, and maintenance saving. These characteristics have been achieved in a safety evaluation that was conducted at the design stage and that included failure mode effect analysis and hazard analysis, and they have also been ensured with control technologies such as triple feedback, external force suppression and push-back control.

## 1 まえがき

鉄道車両用ドアは、乗客と直接接する装置であること、一つ一つが独立したシステムであること、また、車両に搭載される数が多いことから、安全性、信頼性、機能的が高く、さらには、省メンテナンスであることが求められている。富士電機は1999年に電気式ドアの供給を開始した。2014年末までに国内外合わせて30,000開口以上が営業運転で稼働されている。

本稿では、鉄道車両用ドアの最新動向と安全・信頼性技術について述べる。

## 2 電気式ドアの方式と構成機器

### 2.1 電気式ドアの特徴

日本国内では、空気式の戸閉装置が使用されることが多かったが、最近では電気式の戸閉装置が急速に普及しつつある。海外では電気式の戸閉装置は古くから採用されている<sup>(1)</sup>。

電気式ドアは空気式ドアと比較して、空気配管がなくなることによるメリットに加えて、経年変化による外乱の影響を打ち消し、一定の開閉パターンや開閉時間を再現できる電気制御の特徴により、車両システムとしての初期コストや保守コストを軽減することが可能である。また、制御コントローラの機能の柔軟性を生かし、ドアに乗客や荷物が挟まったときの安全性を高めるとともに、データ伝送技術を応用して、出区・始業点検の簡素化やインテリジェント化、ドア単体の自己診断機能を充実することが可能である。

富士電機の電気式ドアは、パワーエレクトロニクス技術と制御技術を生かし、モータの運動方向をそのまま利用し

て側引戸を駆動する方式を採用している。これにより、ドア駆動機構の簡素化、および戸挟み検知感度の向上による高い安全性と信頼性を実現している<sup>(2),(3)</sup>。

### 2.2 リニアモータ方式戸閉装置

富士電機は、モータそのものの動きを側引戸の動きに生かすことのできるリニアモータを使用した戸閉装置を製品化し、納入している。モータの運動の発生方向をそのままドアの動きに生かすことで、余分な運動変換機構をなくすることができる。これにより、乗客や荷物がドアに挟まれたりした場合に早期検知ができるため、安全性が確保できる。リニアモータには、固定子に永久磁石を、可動子にコイルを配した永久磁石リニア同期モータを採用している。図1にリニアモータの構造（断面図）を示す。

両開きの側引戸の場合、二つのモータによってそれぞれのドアを引き分ける方式と、左右のドアを連結し連動させる機構を使って一つのモータで動かす方式とがある。どちらの方式を採用するかは鉄道事業者の安全性、経済性などに関する考え方で決められる。富士電機はいずれの要求に

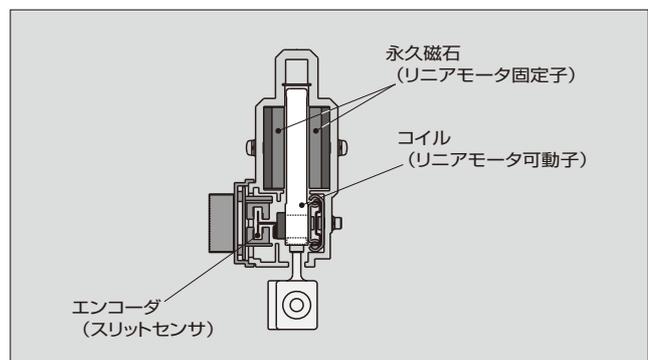


図1 リニアモータの構造（断面図）

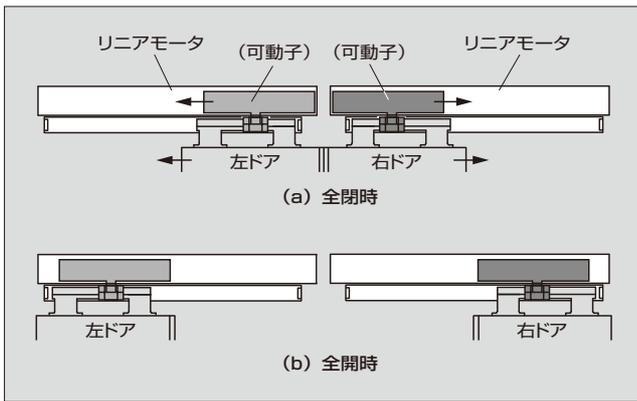


図2 リニアモータ方式（2モータ）戸閉装置の構成

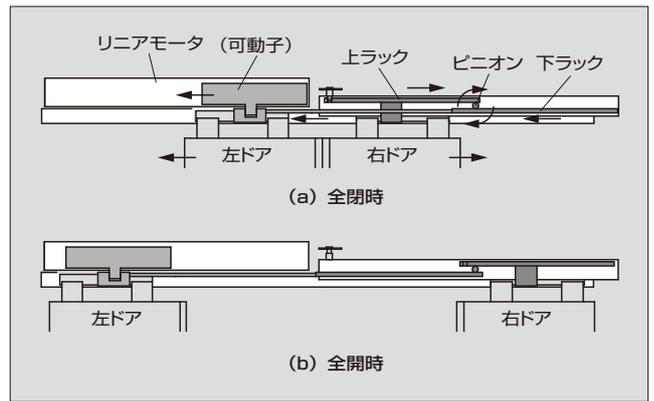


図4 リニアモータ方式（1モータ）戸閉装置の構成



図3 NYCT-R160 電車とリニアモータ方式戸閉装置



図5 JR 東日本 E233 系電車とリニアモータ方式戸閉装置

も応えられるようにしている。

二つのリニアモータで動かす場合には、両リニアモータそのものの動きで直接ドアを開閉するシンプルな構成となる。図2に、二つのリニアモータで左右のドアを開閉する方式の構成を示す。この方式はニューヨーク市地下鉄R160電車（NYCT-R160電車）に採用され、約5,800開口が稼動中である（図3）。

一つのリニアモータで左右のドアを動かす場合には、連動機構にラックとピニオンを用いて開閉する。図4に、一つのリニアモータで左右のドアを開閉する方式の構成を示す。この方式は、東日本旅客鉄道株式会社（JR 東日本）のE233系電車など国内外で採用され、20,000開口以上が稼動中である（図5）。

### 2.3 FCPM方式戸閉装置

FCPM（Flat Cup Permanent Magnet Motor）方式は、ラック・アンド・ピニオン機構のピニオンを回転式モータのFCPMによって回転させ、側引戸を駆動する方式である。図6に、一つの回転モータで左右のドアを開閉する方式を示す。モータ軸に直結されたピニオンの回転により上ラックと下ラックを動作させ、左右のドアを開閉する。モータは鴨居（かもい）内の狭いスペースに収納されるため、扁平（へんぺい）な形状をしたFCPMである。この

FCPM方式は、モータの運動をそのまま側引戸の動きに変えるリニアモータ方式と同様の特徴を持ちながら、さらなる軽量化を実現している。この方式は国内外で十数件の車両プロジェクトに採用され、ゆりかもめなどで営業運転を開始している（図7）。

#### (1) モータ（FCPM）

ドア用のモータには、ラッシュ時には強力な戸閉力、挟み込みには安全で優しい戸閉力、開閉時間と全開停止位置は全数が同一で変化しないこと、鴨居サイズの制約による小型化、長期運用のための省メンテナンス性など、さまざまに相反する要素が求められる。これらを踏まえ、薄型、低速・高トルク、高精度な位置検出といった特徴を持つドア専用モータのFCPMを開発した。3章で述べる制御技術を行えるようにするため、高精度な光学式エンコーダを内蔵し、位置分解能0.01mm、0～100%の推力応答750μs、静止時に500Nのドア押し付けを実現している。

#### (2) 動力伝達機構

モータ軸端に取り付けたピニオンと上下2本のラックから構成される動力反転機構（方向変換装置）により、1台のモータで両開きのドア2枚を駆動する（図4、図6）。

このFCPM方式戸閉装置は、ラック・アンド・ピニオン機構で一般的なボールねじ式のように減速することなく、直接ドア開閉の運動に伝えるため戸挟み検知感度が向上し

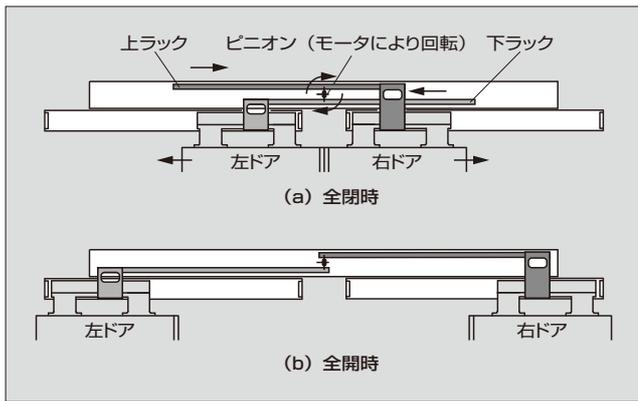


図6 FCPM方式戸閉装置の構成



図7 ゆりかもめ車両とFCPM方式戸閉装置

ている。また、構造が簡素で故障が少なく、メンテナンスもほとんど不要で信頼性が高い。

ある北米向け車両では、車両間にある貫通扉のスペースに制約があり、方向変換装置の長さを短くしなければ設置できなかった。このため、ドア全開閉幅の半分程度の長さのラックを複数使用し、ラックにピニオンを締結させることで長さを短縮した閉装置を開発した(図8)。

ドアの開閉時には、まず、モータ軸の動力供給ピニオンから水平に移動できる中継ラックに力を伝達する。次に、移動する中継ラックの先端に取り付けられている中継ピニオンが、ケースに固定されている固定ラックとかみ合うことにより回転する。進行方向に移動し、かつ進行方向に回転する中継ピニオンによって水平に移動できるドア搬送用ラックを移動させ、ドアを開閉させる。

中継ラック、固定ラック、ドア搬送用ラックをそれぞれドア開口幅の約半分の長さとすることにより、ドア閉装置の全長を通常方式の3/4程度に短縮した。

## 2.4 施錠・解錠装置

施錠装置は、戸閉状態を確実にものとし、ドアの安全性を確保するために最も重要なものの一つである。富士電機では、施錠装置にロックピンを用いた機構を採用している。戸開動作時に施錠状態を解除するための機構を併せ持っており、モータによって発生するドア開方向の推力によって

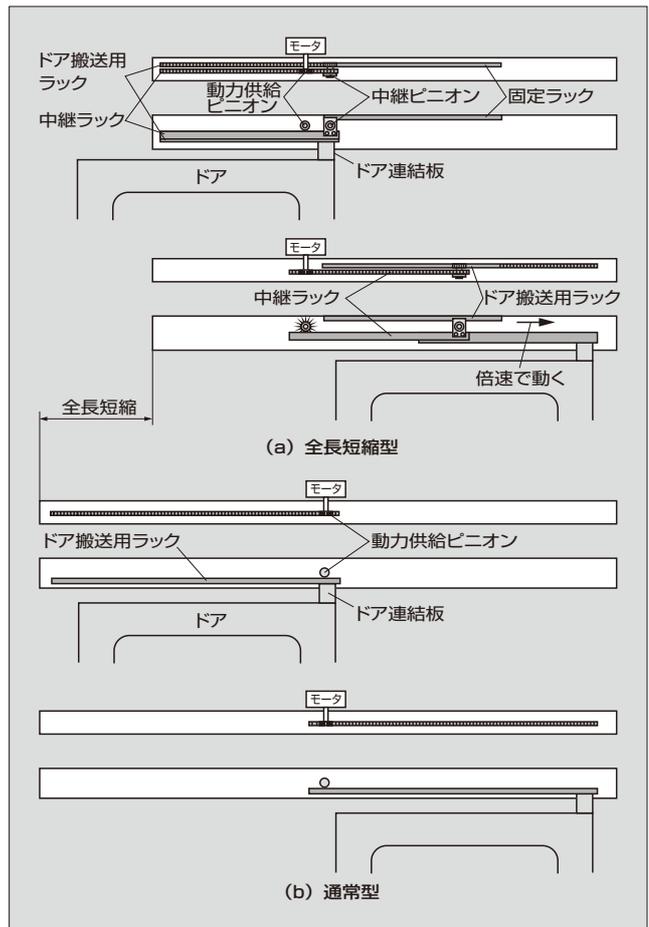


図8 方向変換装置

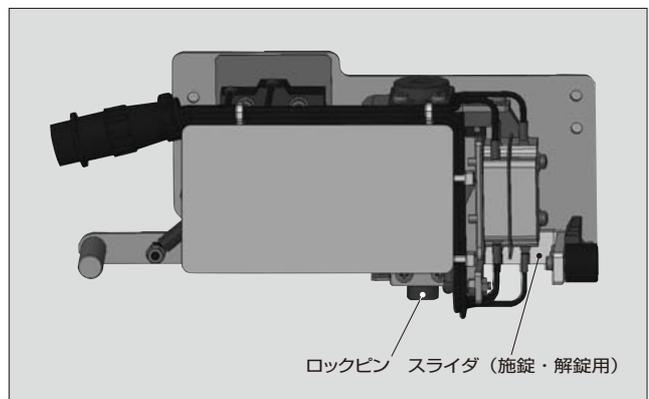


図9 施錠・解錠装置(自己解錠型)

自己解除する方式(図9)と、モータとは別電源のソレノイドによって解除する方式(図10)を用意している。いずれの方式も、非常時に制御電源がない状態でも手動で解錠できる。

また、顧客によっては、ドアの開閉動作と施錠・動作が連動する通常の方式ではなく、ドア開閉と施錠・解錠を独立させたいという要求もある。これに応えるため、ドア開閉と施錠・解錠が独立した機構を開発した(図11)。

## 2.5 非常時の解錠およびアイソレーション装置

開閉機能そのものに付随して、ドアには非常時に制御電

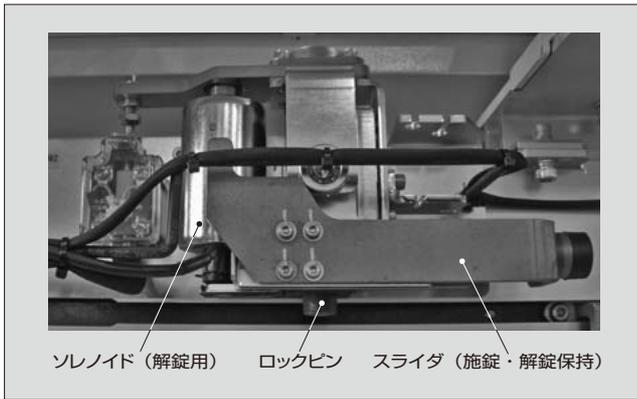


図10 施錠・解錠装置 (ソレノイド解錠型)

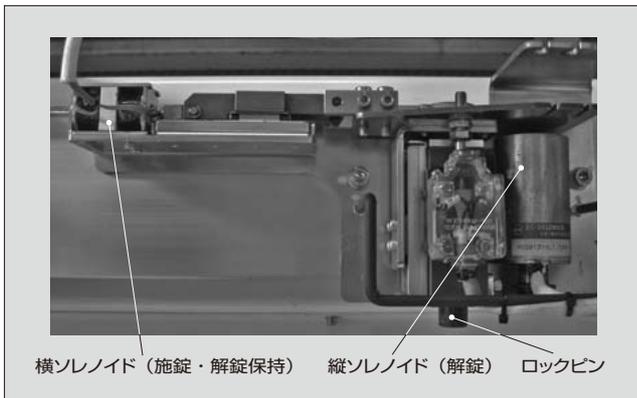


図11 施錠・解錠装置 (ドア開閉と施錠・解錠独立型)

源がない状態でも手動で強制的に解錠・開放するための機能、ならびに故障した特定のドアを暫定的にアイソレート（隔離）して電車の走行を可能にするための機能が要求される。

非常時ドア解錠装置は、図12に示すように通常はハンドルの形態をしており、室内および室外に設置される。戸閉装置本体の施錠・解錠装置と金属製ワイヤで機械的に連結されており、ハンドルを操作することにより解錠を行う。仕様によってはハンドルではなく乗務員が専用のキーによって操作するものもある。また、解錠は乗客でもできるが復帰は乗務員が専用のキーで操作するなど、さまざまな要求に対応する必要がある。さらに、ハンドルの操作力の

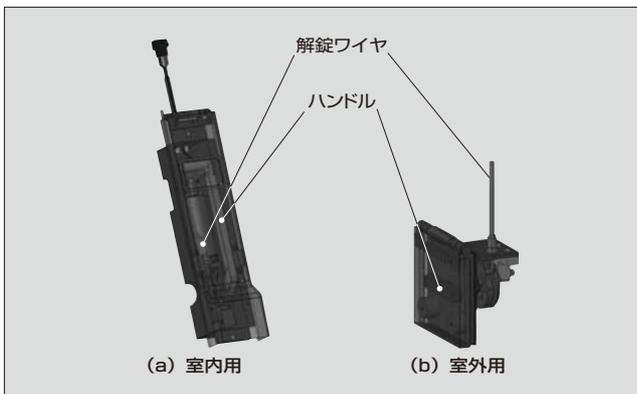


図12 非常時ドア解錠装置

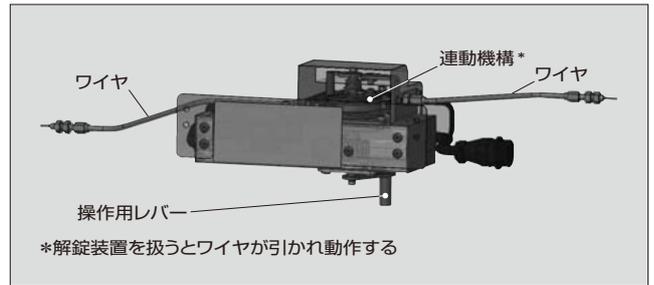


図13 アイソレーション装置 (連動機構付)

仕様が顧客ごとに異なる。装置の設計時においては、解錠ワイヤの車体での敷設ルート（長さ、曲げ回数など）も考慮し、仕様を満足する操作力の算定を行う必要がある。

アイソレーション装置は、故障した特定のドアを機械的に閉状態に保ち、戸閉検知条件や施錠検知条件をバイパスさせて列車全体の発車可能条件を強制的に成立させる装置である。北米では、APTA (American Public Transportation Association) 規格によって非常時ドア解錠装置とアイソレーション装置を連動させること、つまりアイソレーション状態で非常時ドア解錠装置を操作した場合は、自動的にアイソレーション状態を解除してドアを解錠させることという規定がある。連動機構の一例を図13に示す。

## 2.6 コントローラ

電気式ドアのコントローラは、FCPM の特性を生かした高精度で安定したドアの開閉制御を行っている。近年は開閉制御だけでなく、ドアの状況や故障時の解析を行うため、多くの情報を計測し、記録している。日々変化していくドアの健全性を、自己診断により把握する自動試験機能も実装している。車掌や運転手にモニタで情報を伝えるため、RS-485 を用いた HDLC (High-level Data Link Control) や、Ethernet<sup>(注)</sup> などの通信プロトコルに対応している。コントローラには 32 bit 高性能 CPU を採用し、1 チップでドア制御・通信機能や自動試験機能を同時に処理することができる。ソフトウェアは自己更新機能を持ち、通信機能や 2.7 節の PTU (Portable Test Unit) によるソフトウェアの一括更新によって、仕様やパラメータの変更、およびバージョンアップに迅速に対応することができる。

## 2.7 PTU

電車ドアは可動部が多く、乗客と直接干渉するため、故障が発生した場合に車両の運用可否につながる機器である。そのため、故障要因の詳細表示や自己診断により運用継続の判定を早急に行う必要がある。PTU とは、故障時に係員が PC をドア装置に接続し、故障内容の表示、モニタリング、自己診断などを行う専用のソフトウェアである (図14)。

〈注〉 Ethernet：富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標

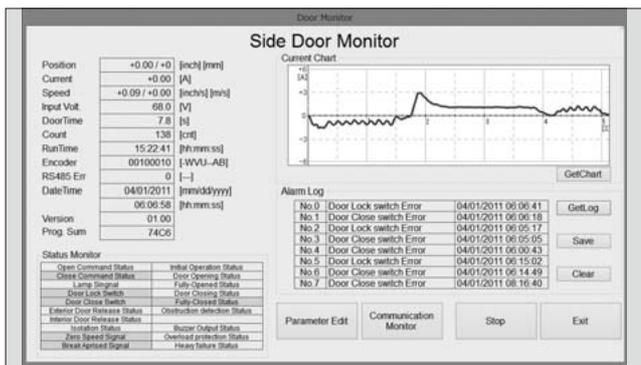


図 14 PTU の画面の例

故障の判定には専門性が求められるため、最終的にはメーカーが対応すべき事項である。しかし、現場では迅速な判定が必要なため、顧客ごとに PTU を用意して保守の現場をサポートすることで、円滑な運用に貢献している。

### ③ 安全と信頼性の技術

#### 3.1 設計時の安全性評価

車両のドアは乗客の乗降に関わるとともに、車両走行中は乗客の安全を確保する重要な機器であるため、その動作には高度な安全と信頼性が要求される。このため、設計審査の過程で FMECA (Failure Modes Effects and Criticality Analysis: 故障モード影響解析) や Hazard Analysis (危険分析) などによってその安全設計思想が厳しく吟味され、満足していない場合は設計変更も必要となる。また、耐 Vandalism (公共物破壊行為) として、強引な操作やいたずらにより、ドアシステムに影響がないことが求められる。特に海外向け車両ではその傾向が強い。

北米向け車両で求められるいわゆる RAMS 関係の検討事項は次に示すとおりである。FMECA の例 (イメージ) を図 15 に示す。

- (1) Reliability Prediction Report (信頼性予測報告)
- (2) Availability Prediction Report (可用性予測報告)
- (3) Maintainability Analysis (保全性分析)
- (4) Preliminary Hazard Analysis (危険予測分析)
- (5) FMECA (故障モード影響解析)

#### 3.2 制御技術

ドアの開閉制御における安全性と安定性のさらなる向上のために、新たな制御技術の研究と開発を行っている。

Door Name / Functional Subsystem	Function	Failure Mode	Failure Cause	Failure Effects	Severity (S)	Failure Mechanism	Failure Consequence	Failure Detection	Failure Mitigation	Design Action Recommendation
Door Lock	To lock the door	Door does not lock	Door lock solenoid failure	Passengers cannot board/alight safely	NA	Electrical	Door lock solenoid failure	Door lock status sensor	Door lock status sensor	High reliability solenoid
Door Release	To release the door	Door does not release	Door release solenoid failure	Passengers cannot board/alight safely	NA	Electrical	Door release solenoid failure	Door release status sensor	Door release status sensor	High reliability solenoid
Door Close	To close the door	Door does not close	Door close solenoid failure	Passengers cannot board/alight safely	NA	Electrical	Door close solenoid failure	Door close status sensor	Door close status sensor	High reliability solenoid

図 15 FMECA の例 (イメージ)

ドアの基本制御として富士電機が保有するサーボ技術を生かし、繊細でなめらかなドア駆動が行えるように、推力(電流)、速度、位置の3重フィードバック制御を採用している(図16)。

ドア特有の問題として、ラッシュ時の戸閉遅れがたびたび取り上げられている。これは平常時と比べて満員のラッシュ時に必要な駆動力が10倍以上にもなるため、制御パターンが追従できない際に発生していた。そこで外力を計測し打ち消すことで安定した動作を行う“外力抑制制御”を採用している。最大8名が強力にドアに寄りかかるラッシュを模擬した実験において、従来制御では10.0s以上の遅れを発生させていた条件でも、0.2sとほとんど遅れない安定した動作を実現させている(図17,表1)。

強固な戸閉状態を維持するため、ロック装置を用いている電気式ドアでは、ぎ装の調整の難しさや故障などの課題を抱えている。そこでモータにより強固な戸閉状態を実現するために“押し返し制御”の研究に取り組んでいる。これはモータ制御により戸閉状態を維持することで、ぎ装時の細かい調整を行うことなく、簡素なロック装置で安全を確保することを目指している。強引に開こうとする外力によってドアが開かれることを瞬時に判定し、強固に押し返すことでこれを阻止している(図18)。

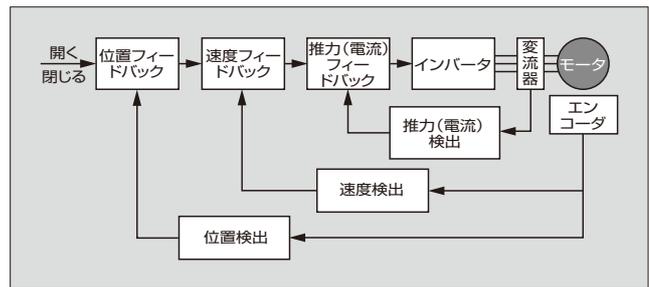


図 16 3重フィードバック制御

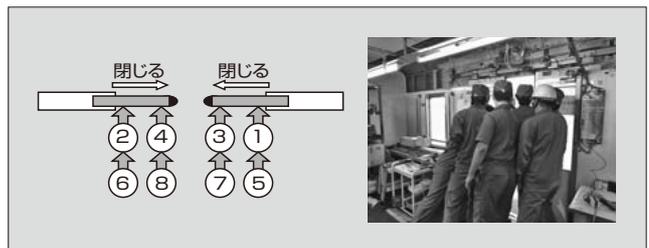


図 17 外力抑制制御実験

表 1 ラッシュアワーを想定した閉時間

人数 (人)	提案機種		従来機種	
	閉時間 (s)	遅れ (s)	閉時間 (s)	遅れ (s)
0	3.33	-	3.15	-
1	3.36	+0.04	4.09	+0.94
2	3.41	+0.08	9.38	+6.23
4	3.51	+0.18	14.03	+10.88
8	3.55	+0.22	15.05	+11.90

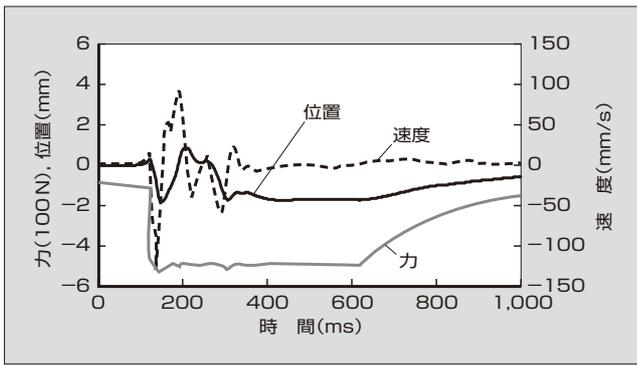


図 18 押し返し制御実験

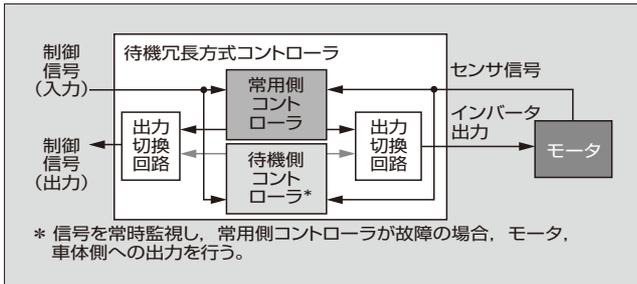


図 19 待機冗長方式コントローラ

営業運転車両に搭載して行った検証では、15万回の開閉動作において、約 300 回の開こうとする事象が発生したが、一回も 1.0mm 以上開くことはなく、安全な制御を実現している。

### 3.3 待機冗長方式コントローラ

ドアは 1 編成当たりの台数が多く、1 か所の故障が車両だけでなく、路線全体に影響を与える可能性があるため、高い信頼性が求められる機器である。従来機の場合、途中駅で故障が発生した場合は、乗客に代替車両に移動してもらうことなどにより、大きな遅れが発生することがあった。富士電機では、待機冗長構成により内部構造を二重化し、故障時は待機側で運用が可能なコントローラを採用することで信頼性を高めている (図 19)。

## 4 あとがき

富士電機の鉄道車両用ドアは、リニアモータ方式と FCPM 方式のいずれも国内外のお客さまに採用されている。今後も、鉄道車両用ドアが乗客にとって一番身近な機器であることを、また車両の安定運行にとって最も重要な機器であることを常に意識し、さらに安全性、信頼性に磨きをかけ、お客さまの期待と満足に応えていく所存である。

### 参考文献

- (1) 梅澤幸太郎. 鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器. 富士時報. 2012, vol.85. no.3, p.220-225.
- (2) 梅澤幸太郎ほか. リニアモータ式側引戸用戸閉装置. 富士時報. 2006, vol.79, no.2, p.128-133.
- (3) 梅澤幸太郎. 電気式戸閉装置の構造と機能について. 鉄道車両工業. 2012, no.461.
- (4) 稲玉繁樹ほか. 外力抑制制御によりラッシュ時の戸閉遅れを解消する電車でドアシステム. J-RAIL2011 S5-2-4, 2011.
- (5) 稲玉繁樹ほか. 電気式戸閉装置のロック機構簡素化を目指した押し返し制御. J-RAIL2013 S5-1-1, 2013.



梅澤 幸太郎

施設設備関連エンジニアリング業務、鉄道車両用電機品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鈴鹿工場電機機器設計部担当課長。



寺崎 富雄

中型回転機の設計、各種産業向けシステムの開発、鉄道車両用戸閉装置の設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部鈴鹿工場電子機器設計部課長補佐。



稲玉 繁樹

電車でドアシステムのシステム設計およびソフトウェア設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部鈴鹿工場電子機器設計部課長補佐。電気学会 (正員)。

# 北陸新幹線新黒部変電所向け電力補償装置

Railway Static Power Conditioner for Shin-Kurobe Substation of Hokuriku Shinkansen

尾曾 弘 OSO, Hiroshi

金子 知実 KANEKO, Tomomi

鈴木 明夫 SUZUKI, Aki

北陸新幹線の長野・金沢間にある新黒部変電所に電力補償装置を納入した。本装置は、列車の走行時に生じる三相不平衡と電圧変動を長野方と金沢方の2回路間の電力融通によって補償し、さらに列車から発生する特別高圧の高調波電流を補償するものであり、インバータ装置やインバータ変圧器などから成る。インバータ装置では、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の電流分担の均等化およびユニットの水冷方式を開発することにより、装置の大容量化・小型化を実現した。インバータ変圧器では、ギャップレス変圧器の採用により低騒音化・高信頼性化を実現した。

Fuji Electric has delivered a railway static power conditioner (RPC) to Shin-Kurobe Substation, located between Nagano and Kanazawa on the Hokuriku Shinkansen Line. This equipment is composed of an inverter and an inverter transformer. While the trains run, it compensates for the unbalanced load in 3 phases and voltage fluctuation by interchanging power between two circuits in the direction of Nagano and Kanazawa. It also compensates for the harmonic current generated by trains. We developed a high-capacity downsized inverter by engaging a water-cooling system and equalizing the current sharing of insulated gate bipolar transistors (IGBTs). We adopted a gapless transformer for the inverter transformer to achieve low-noise level and high reliability.

## 1 まえがき

整備新幹線計画の一環として、北陸新幹線は、既に開業している高崎・長野間に続き、長野・金沢間が2015年3月14日に開業した。北陸新幹線の路線を図1に示す。

長野・金沢間には、新長野、新上越、新黒部、新高岡、新白山、白山車両基地の6か所に変電所が設けられた。この中で、新黒部変電所は最も短絡容量が小さく、き電区間が長くなるため、変電所の受電電圧変動が発生する。これを抑制するために、電力補償装置 (RPC: Railway static Power Conditioner) を納入した。

今回納入した電力補償装置は、最新のパワーエレクトロニクス技術を駆使したインバータやインバータ変圧器を採用するとともに、最新の制御技術を適用している。本稿で

は、装置の概要と制御技術について述べる。

## 2 電力補償装置 (RPC) の概要

### 2.1 電力融通の概念

電力融通の概念を図2に示す。新幹線用の交流変電所では、スコット結線変圧器およびルーフ・デルタ結線変圧器によって、き電用単相交流60kV 2回線に降圧し、それぞれM座とT座にき電する。列車の走行により、この2回線が不平衡になると三相側も三相電圧不平衡になり、特定の相の電圧変動が大きくなる。そこで、電力補償装置を用いて、き電用変圧器のき電側において単相2回線の母線に電力変換器を接続し、回路間の有効電力の融通とき電の無効電力補償を同時に行うことにより、三相不平衡補償と電圧変動補償を実施し、さらに列車から発生する特別高圧の高調波電流を補償する。変電所の機器構成により電力融通ができない場合は、無効電力補償装置 (SVC: Static Var Compensator) として運用する場合もある。

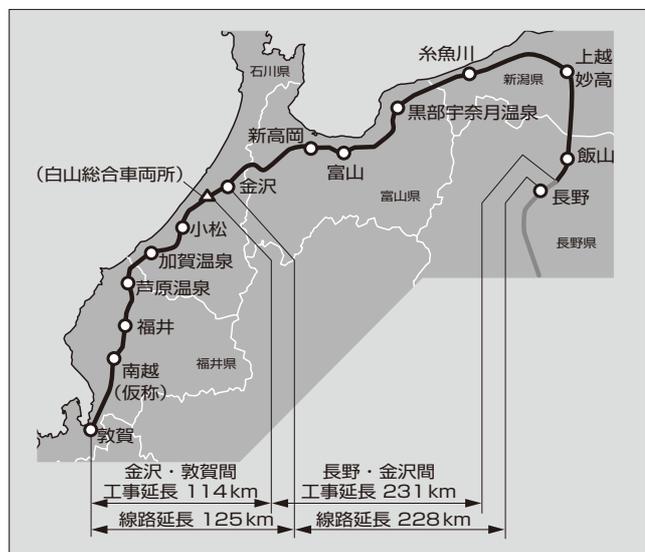


図1 北陸新幹線の路線

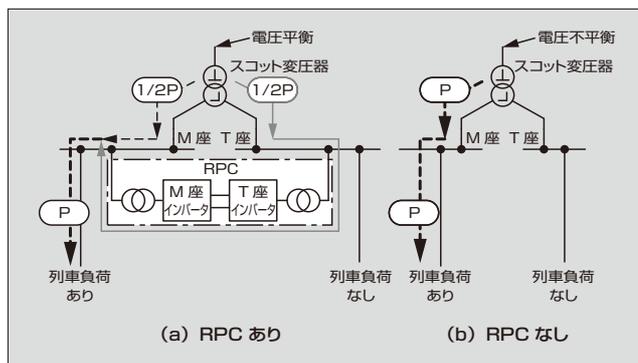


図2 電力融通の概念

## 2.2 RPCの構成と仕様

新黒部変電所の単線結線図を図3に示す。新黒部変電所は、154kV受電2回線、き電4回線およびRPCの構成となっている。長野方と金沢方の負荷が不一致の場合に、RPCによりM座、T座それぞれのき電電力をRPCの装置容量の範囲内で一致させ、受電電圧の平衡化を行う。

図4に新黒部変電所のRPCの基本構成を示す。RPCは、M座、T座のそれぞれのき電母線から、遮断器とインバータ変圧器を介して、それぞれM座側、T座側の単相インバータ2組を直流部で接続することにより、M座とT座の交流電力を、直流を介して融通する構成としている。RPCは、1セット7.5MVAの装置を2セット設け、全体で15MVAとしている。表1にRPCの主な仕様を示す。

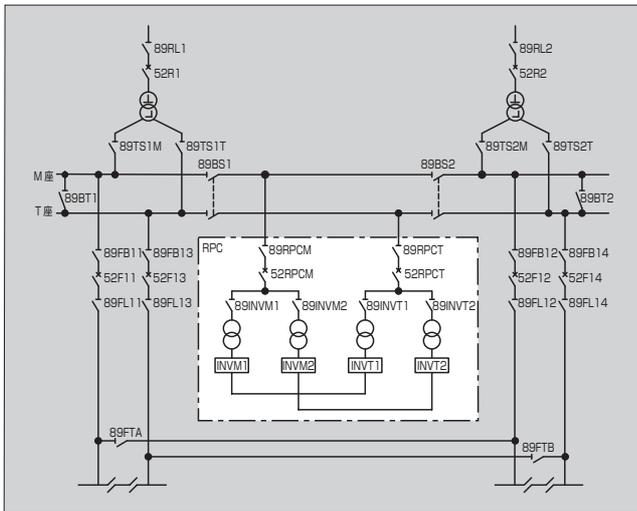


図3 新黒部変電所の単線結線図

表1 RPCの主な仕様

項目	内容
定格容量	15MVA (7.5MVA×両座) ×2バンク
	RPC : 15MVA (7.5MVA×2バンク) SVC : 30MVA (15MVA×2バンク)
定格周波数	60Hz
定格電圧	60kV
インバータ出力電圧	2,460V
直流電圧	2,200V×2
バンク構成	7.5MVA (3レベルインバータ×並列4多重) ×両座
キャリア周波数	540Hz (9パルス正弦波PWM)
等価キャリア周波数	4,320Hz (4多重×2)
直流コンデンサ容量	24.3mF×2バンク
冷却	純水循環+不凍液循環+風冷
制御	有効電力融通制御・無効電力補償制御 (RPCモード) 無効電力補償制御 (SVC-Qモード) き電電圧一定制御 (SVC-Vモード) 高調波補償 (第3, 5, 7, 9次高調波補償, 共振時補償停止機能付き)

## 2.3 RPCの運用

RPCの運用モードを図5に示す。通常は図5(a)のRPCモードで運用し、M座、T座のき電側負荷の有効電力に差がある場合に、差の1/2の有効電力をRPCを介して融通し、スコット結線変圧器の2次側のM座、T座の有効電力を同一にして変圧器1次側の三相有効電力を平衡化している。変電所直下でM座とT座の切替えを行わない場合は、図5(b)のSVC-Qモード(無効電力補償制御)で運用し、何らかの理由により変電所として運用しない場合には、図5(c)のSVC-Vモード(き電電圧一定制御)で運用する。制御の詳細については5章で述べる。

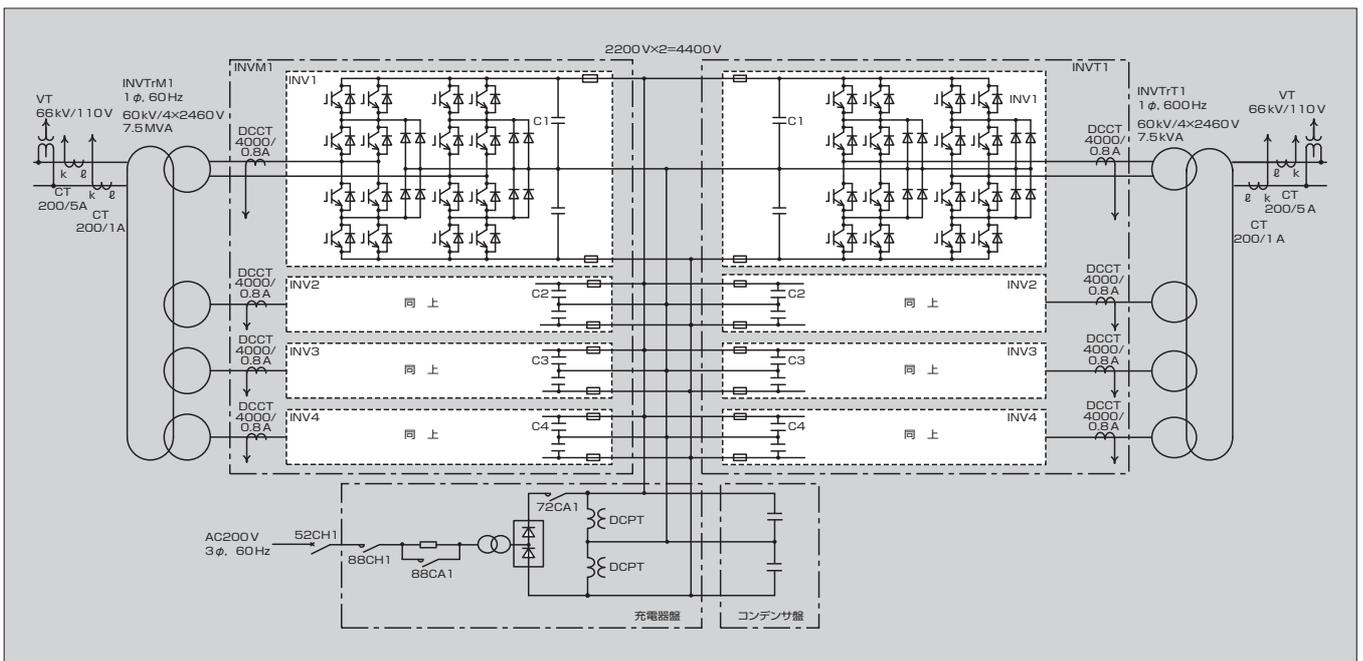


図4 RPCの基本構成

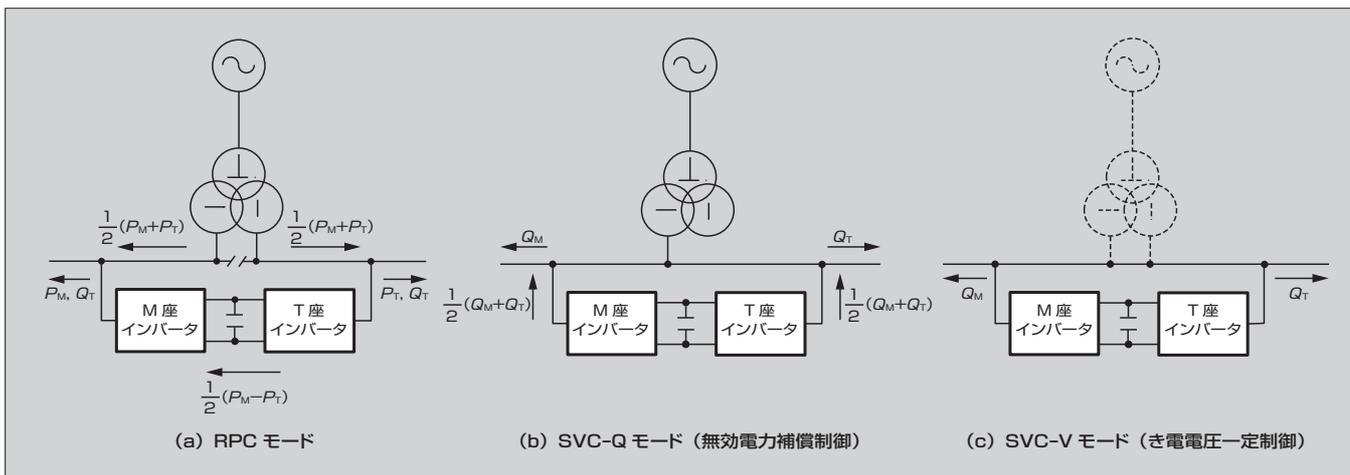


図5 RPCの運用モード

### 3 インバータ装置

インバータ装置の外観を図6に示す。インバータ装置は、3レベル単相のインバータユニット4台を1面に実装したものの2面とコンデンサバンク1面で構成している。

インバータユニットの外観と回路図を図7に示す。

#### 3.1 インバータユニット

開発したインバータユニットは、定格4.5kV 1.2kAのモジュール型IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



図6 インバータ装置

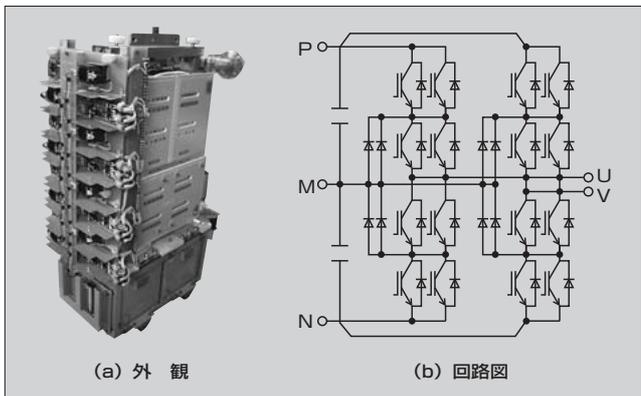


図7 インバータユニット

2個を並列で接続することで大容量化を図り、1ユニットで3.3MVAの能力を持つ。開発における要点を次に示す。

#### (1) IGBTの電流分担の均等化

並列に接続したIGBTの性能を最大限に引き出すためには、各IGBTの電流分担の均等化が必要である。そこで、直流コンデンサを含めた部品配置を適正化するとともに、主回路配線にラミネートブスバーを採用し、低インダクタンス化した。三次元磁界解析によって、電流密度、インダクタンス、ブスバーの発生損失などを計算し、ラミネートブスバーの構造検討を行った。本解析では、回路シミュレーションによりPWM (Pulse Width Modulation) インバータのスイッチングモードごとに各ブスバーに流れる電流の周波数成分を算出し、各周波数成分ごとの電流密度分布を評価した。図8に三次元磁界解析結果の例を示す。解析結果から局部的に電流密度の高い領域があることが分かった。実機における連続通流試験では当該部の温度上昇を評価し、ブスバーの許容温度以下であることを確認した。

#### (2) IGBTの冷却方式

IGBTを効率的に冷却してIGBTの利用率を向上させるために、ユニットを水冷方式とした。さらにユニットのコンパクト化を図るため、IGBTの冷却用に水冷ホースを使用しない薄型の冷却体を開発した。この冷却構造の開発においては、水冷のモデル装置による腐食検証を長期にわたって行い、信頼性を確認した。

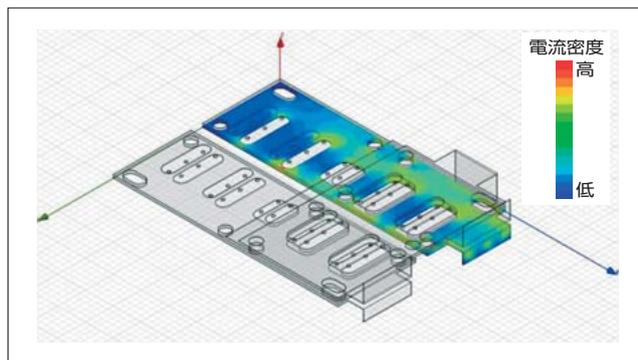


図8 三次元磁界解析結果の例

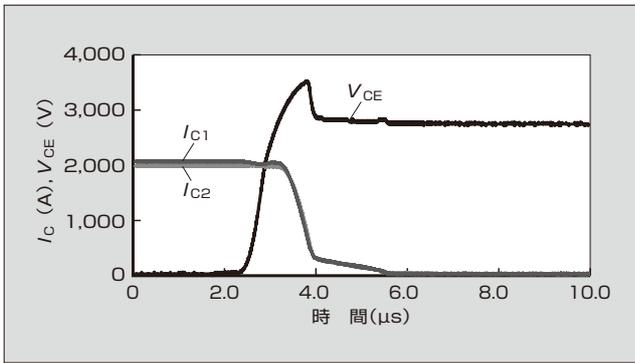


図9 2並列IGBTのターンオフ波形

また、IGBTの特性は温度によって変化するので、2並列のIGBTの電流分担と損失を均等化するために、IGBTのケース温度がそろるように2個のIGBTの冷却体への配置を工夫している。

### (3) ユニット構造

昇降リフトを使用せずに盤体から容易に引き出せるユニット構造とし、ユニットの交換や保守・点検における作業性と安全性を向上させている。

## 3.2 インバータユニットの評価

スイッチング試験を行ってスイッチング損失を評価するとともに、並列素子間の電流分担を測定した結果、2並列間の電流分担はほぼ均一であり、電流不平衡率が10%以下であることを確認した。系統じょう乱などの異常時の装置過電流を考慮したユニットの遮断性能実証確認においては、装置定格電流ピーク値の約4倍の電流(4,000 A)を遮断した場合でも、ターンオフ時の跳ね上がり電圧は約3,500 Vであった。この電圧は、IGBTの許容電圧(4,500 V)を十分に下回っており、異常発生時にも装置を安全に停止することができる。図9に、その条件におけるIGBTのターンオフ波形を示す。

## 4 インバータ変圧器

インバータ変圧器は、多重出力構造としている。外観を図10に、主な仕様を表2に示す。

インバータ変圧器の騒音を低減するために、ギャップレス方式の鉄心を採用し、通常の変圧器と同様の構造を実現することで騒音を低減するとともに、二重タンク構造として敷地境界における騒音値は50 dBAを実現した。

インバータによって励磁されるインバータ変圧器は方形波が印加されることから、正弦波励磁と比較して鉄心責務が過酷になる。そのため、正弦波励磁とインバータ励磁のそれぞれにおける無負荷損失特性、飽和特性、無負荷電流特性、直流偏磁特性などを検討して、最適な磁束密度を決定し、装置の低騒音化と信頼性の向上および小型化の両立を図っている。

また、インバータのPWM制御による運転時の損失増加を見込んだ冷却設計を実施している。



図10 インバータ変圧器

表2 インバータ変圧器の主な仕様

項目	内容
定格容量	7.5 MVA
定格電圧	60 kV / 2,460 V × 4多重
定格周波数	60 Hz
相数	単相
冷却方式	油入自冷式
境界騒音	50 dBA
台数	4台 (両座 × 2バンク)

## 5 制御技術

図11に、RPCモードの制御ブロック図を示す。RPCモードでは、変電所き電電圧とき電電流から、M座とT座それぞれの変電所出力の有効電力と無効電力を演算している。M座とT座の有効電力の差分の1/2をRPCが融通することにより、スコット変圧器のM座とT座の有効電力出力の均等化を図っている。一方、無効電力補償は、M座とT座で個別に行っている。変電所出力無効電力と逆極性の無効電力をRPCが出力することにより、スコット変圧器の無効電力出力を打ち消している。RPCの有効電力融通量(指令)と無効電力補償量(指令)の合成容量がRPC定格容量内であれば、スコット変圧器の受電電流は力率1の三相平衡電流となる。合成容量がRPC定格容量を超過する場合には、RPCの出力が定格容量を超えないように、有効電力融通量と無効電力補償量を同じ比率で制限(等比制限)する。

図12に、SVC-Qモードの制御ブロック図を示す。SVC-Qモードでは、き電を行っている座の変電所送り出し電圧・電流から変電所出力無効電力を演算している。そして、その無効電力と逆極性の無効電力をRPCが出力することにより、無効電力補償を行う。

RPCモードとSVC-Qモードでは、基本波成分(有効電力融通分と無効電力補償分)を出力した余剰の容量で高調波補償を行う。図11と図12に示すように、検出した変電所送り出し電流のフーリエ変換を行い、補償対象である

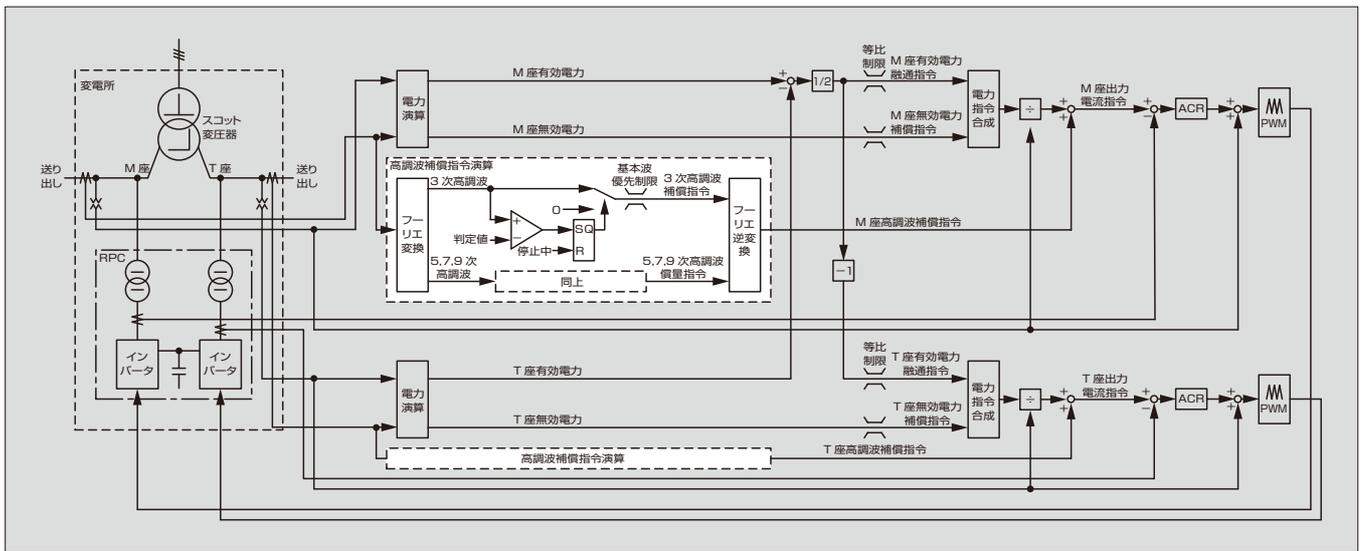


図 11 RPC モードの制御ブロック図

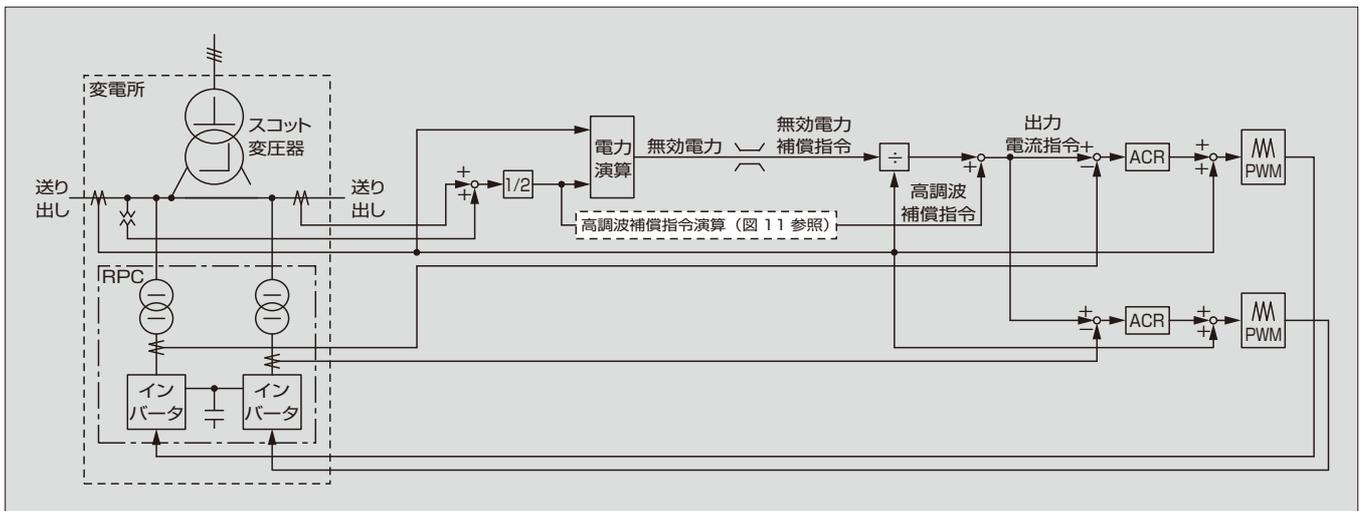


図 12 SVC-Q モードの制御ブロック図

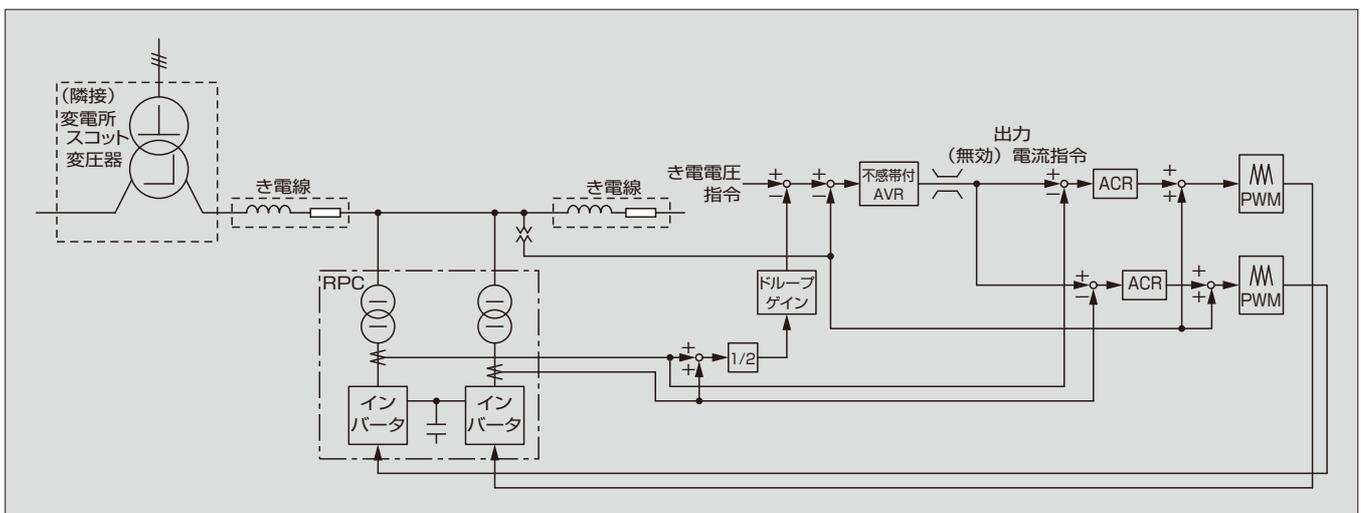


図 13 SVC-V モードの制御ブロック図

3次、5次、7次、9次成分の高調波を抽出し、さらに、抽出した各次成分のフーリエ逆変換を行うことにより、高調

波電流指令を生成する。ここで、き電線と大地間の浮遊容量と、き電線のインダクタンスとの共振周波数が、補償対

象の高調波次数に近い場合、高調波を増幅してしまうことがある。そのため、フーリエ変換を行った各次成分が判定値を超過した場合には、高調波を増幅していると判断し、判定値を超過した次数の高調波補償を停止する機能を設けている。この機能により、き電系統の構成切替えや気象条件などによって、き電線のインピーダンスや電線と大地間の浮遊容量が変化して共振周波数が補償対象の高調波次数に近づいた場合にも、高調波を増幅させることなく安定した運用が可能となる。

図 13 に、SVC-V モードの制御ブロック図を示す。SVC-V モードでは、RPC は変電所直下ではなく、き電系統の途中に接続される。そのため、有効電力融通・無効電力補償ではなく、連系点の電圧制御を行う。電圧制御は、連系点の電圧が設定範囲内に収まるように、無効電力出力を調整することで行う。ただし、き電電圧はある範囲内に収まっていればよいので、電圧制御に不感帯を設けて無効電力の出力を抑え、装置損失の低減を図っている。また、2バンクのRPC が個別に連系点の電圧を検出して電圧制御を行うため、2バンク間の無効電力出力が均衡するように補償ループを設けている。

## 6 あとがき

北陸新幹線新黒部変電所向け電力補償装置の概要と制御技術について述べた。本装置は北陸新幹線の開業とともに順調に運用を開始した。今後も、パワーエレクトロニクス技術を利用した高性能な電力変換装置の開発を推進していく所存である。

最後に、電力補償装置の開発・運用に当たり、ご指導・ご協力いただいた独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構をはじめ、関係各位に深く感謝する次第である。

## 参考文献

- (1) 兎東哲夫, 池戸昭治. 新幹線用電圧変動補償装置の実用化. 鉄道総研報告書. 2005, vol.19, no.7, p. 41-46.
- (2) 大宮司ほか. “無効電力補償装置用インバータユニットの開発”. 平成23年電気学会全国大会講演論文集. 2011, p. 277-278.



### 尾曾 弘

電気鉄道用変電・制御システムの技術企画業務に従事。現在、富士電機株式会社産業インフラ事業本部変電システム事業部交通技術部主任。電気学会会員。



### 金子 知実

パワーエレクトロニクス製品の開発、設計に従事。現在、富士電機株式会社産業インフラ事業本部千葉工場設計第二部主任。



### 鈴木 明夫

パワーエレクトロニクス製品の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワーエレクトロニクス技術開発センター電機制御技術開発部マネージャー。電気学会会員。



# 港湾および造船所向け多機能陸電設備

## Multifunctional On-Shore Power Systems for Harbors and Shipyards

宮下 勉 MIYASHITA, Tsutomu

梅沢 一喜 UMEZAWA, Kazuyoshi

城市 洋 JOICHI, Hiroshi

近年、海運業や造船業においても環境負荷の低減が求められている。これに応えるため、富士電機は、商用（所内）系統から船内負荷への給電機能と船内発電機の負荷試験機能を併せ持った多機能陸電設備を開発した。本設備は屋外に設置されるため、メンテナンスが容易な配置や効果的な冷却方式を検討し、主要装置をコンテナハウスに収納した。コンテナハウスは複数台並列に接続できるため、大容量化が容易である。制御機能の特徴は、任意の電圧・周波数で船内負荷へ給電できること、船内発電機の負荷試験を抵抗消費だけでなく電源回生でも行えることなどである。

In recent years, even in the maritime and shipbuilding industries, reduction of environmental impact has come to be required. To meet that issue, Fuji Electric has developed a multifunctional on-shore power system equipped with both power supply functions for the on-board power systems and load testing functions for the on-board generator. Since this system is installed outdoors, we examined its placement to make maintenance easy and give it an effective cooling system and decided to install the main facilities in a container of use outdoors. The containers can be connected in parallel so that it is easy to enlarge the capacity. The facility's characteristic control functions include abilities to supply power to on-board power systems at the desired voltage/frequency and to conduct a load test for the on-board generators via load resistor or power regeneration.

### ① まえがき

近年、海運業や造船業においても環境負荷の低減が求められている。これに応えるため、富士電機は、商用（所内）系統から船内負荷への給電機能と船内発電機の負荷試験機能を併せ持った多機能陸電設備を開発した。本設備は、港湾や造船所といった塩害地の屋外に設置されることを考慮し、電力変換装置を組み込んだ変換器盤や制御盤をコンテナハウスに収納した。本稿では、コンテナハウスや変換器盤の構造と電力変換装置の制御技術について述べる。

### ② 概要

#### 2.1 設備仕様

コンテナハウス1棟当たりの設備仕様は次のとおりである。コンテナハウスを複数台接続することにより大容量化が可能である。また、入力電圧および出力電圧はともに、任意に変更が可能である。

- (a) 容量：1,667 kVA 連続、過負荷耐量 115% 1時間
- (b) 入力電源：6,600 V または 3,300 V, 50 Hz または 60 Hz
- (c) 出力電源：11,000 V または 6,600 V, 50 Hz または 60 Hz
- (d) コンテナハウス寸法：W7,400 × D2,600 × H3,200 (mm)
- (e) コンテナハウス質量：約 21 t

#### 2.2 制御機能の特徴

- (a) 商用（所内）系統から船内系統に任意の電圧、周波数の給電が可能である。
- (b) 電源回生または抵抗消費による船内発電機の負荷

試験が可能である。また、試験のための負荷パターン（有効電力、力率、電力変化量）は任意に設定でき、再現性にも優れている。

- (c) 船内変圧器の投入によって過大な励磁突入電流が流れても、トリップすることなく給電の継続が可能である。
- (d) 複数のコンテナハウスで運用することによって、一部の機器が故障しても、減機運転による給電の継続が可能である。
- (e) 商用系統や船内系統に対する自動同期投入および解列<sup>(注)</sup>が可能である。
- (f) 船内負荷の事故時など、船内系統に変動が生じたときに商用系統のじょう乱を抑制できる。
- (g) 船内からの遠方操作や状態監視が可能である。

### ③ 変換器盤などの収納構造

#### 3.1 構造概要

本設備は港湾や造船所の屋外に設置されるが、変換器盤や制御盤を個々に屋外仕様とするには、寸法やコストの面から実現が難しい。そこで、装置一式を屋外環境に対応したコンテナハウスに収納した。また、同一構成のコンテナハウスを複数台並列に接続することによって大容量化に対応できる構造とした。図1にコンテナハウスの外観を、図2に外形図を、図3にコンテナハウス内部の盤配置図を示す。コンテナハウスの天井部には空冷式の負荷抵抗器を搭載している。内部は中央通路式とし、制御盤、変換器盤、補助盤をそれぞれマスタ側とスレーブ側が対向するように配置した。さらに、通路の一番奥には水冷式の熱交換器を

〈注〉解列：電力系統から電気設備を切り離すこと



図1 コンテナハウス

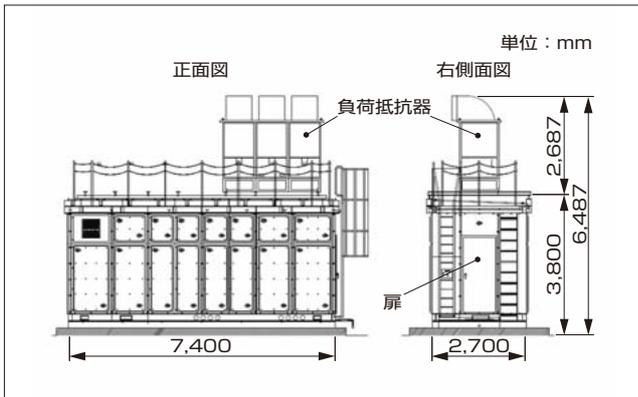


図2 コンテナハウス外形図

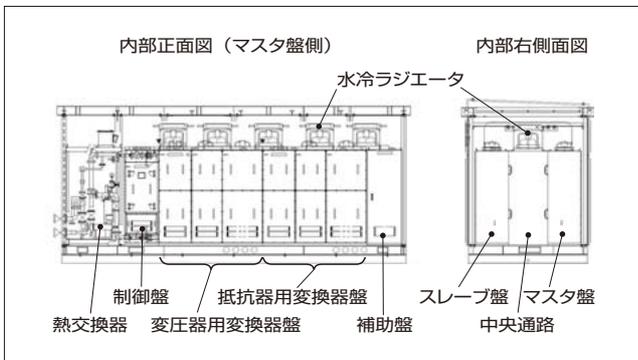


図3 コンテナハウス内部盤配置図

配置し、通常のメンテナンスを全て通路から行えるようにした。コンテナハウスは完全密閉ではなく、耐塩フィルタを備えた換気ファンによって外気を取り込んで与圧している。これにより、隙間からの海塩粒子やじんあいの侵入を防いでいる。

本設備には、変圧器用変換器盤と抵抗器用変換器盤の二つの変換器盤があり、基本構造は同一としている。これにより、変換器盤内部のパワースタック、リアクトル、コンデンサなどの機器も同一であるため、メンテナンスが容易である。また、これらは、風力発電用コンバータ盤をベースにして構造と冷却システムの最適化を行っている。

### 3.2 コンテナハウス内設備の冷却

本設備の各変換器盤には、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子を搭載したパワースタックを3台収納している。素子を効率よく冷却するため、アルミニウム製の水冷ヒートシンクを用いている。

また、リアクトルも水冷式とした。銅巻線内に直接冷媒を流して冷却する直接水冷方式を採用し、高い冷却能力を得ている。冷媒には、不凍液に比べて熱輸送量の大きい純水を使用している。純水の使用に当たり次の課題があった。

- (a) パワースタックのヒートシンクはアルミニウム製であり、冷媒を純水にすると腐食する恐れがある。
- (b) 同一水冷系統上にアルミニウムと銅が存在するため、異種金属接触腐食の影響が懸念される。

そのため、長期耐食試験を行い、アルミニウム表面に被膜を生成することで腐食が抑えられ、品質を確保できることを確認した。

一方、変換器盤や制御盤には空冷機器もあるため、コンテナハウス内の空気を冷却する必要があった。そこで、コンテナハウスの天井部に水冷ラジエータを配置し、変換器盤から排出された空気をこのラジエータで冷却して通路に戻し、再び盤内に供給する方式とした。ラジエータを冷却する純水用の配管は変換器盤の配管と並列に接続した(図4)。

水冷系統は、マスタ側の変換器盤、スレーブ側の変換器盤、ラジエータの3系統とした。変換器盤内のパワースタックとリアクトルは直接純水で冷却されるのに対し、各盤の空冷機器は循環空気を介してラジエータで冷却されるため、熱冷却バランスが非常に重要であった。そこで、図5に示すモデルを用いて熱解析ソフトウェアで各機器の熱冷却やコンテナハウス内の気流解析を行い(図6)、必要となる純水の流量とラジエータ数を決定した。その結果、熱交換器から404 L/minの純水を供給し、変換器盤にはそれぞれ127 L/min、ラジエータには150 L/minを分配することとした。

次に、配管解析ソフトウェアで各配管の圧力損失を分析し、所定の流量を確保できるかどうかを確認した。流量不

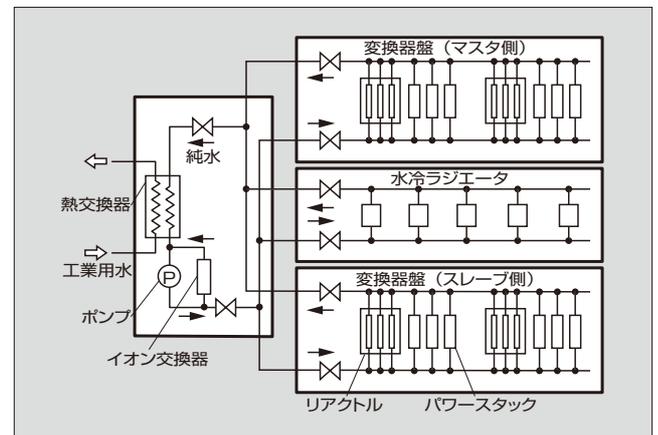


図4 コンテナハウス内水冷系統図

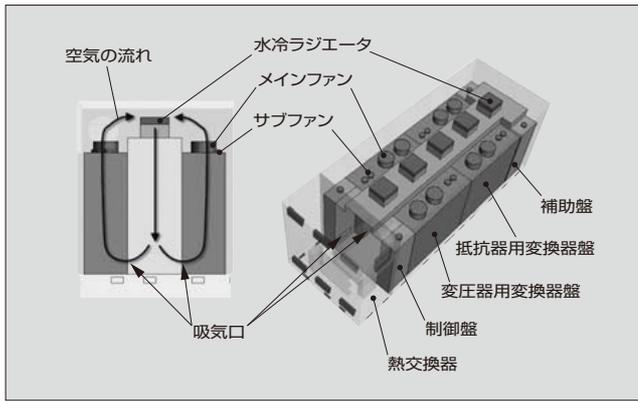


図5 コンテナハウスの気流解析モデル

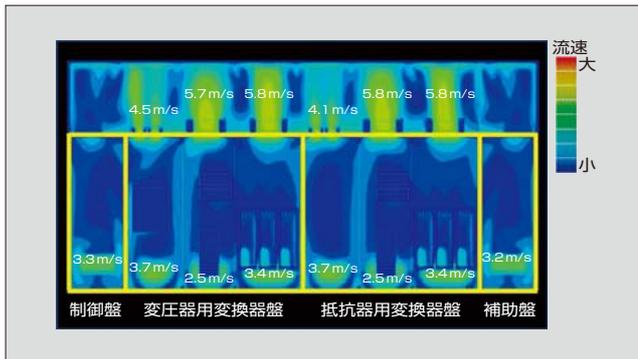


図6 コンテナハウスの気流解析結果

足が懸念される部位は配管径を大きくしたり、圧力損失の少ない機器に変更するなどして改善した。

熱交換器は外部から供給される工業用水を用いて冷却する方式とし、計器類をメンテナンスが容易な位置に配置した。これらの工夫により、最適な構造と冷却システムを構築できた。

#### 4 電力変換装置の制御技術

本設備は、同一の電力変換装置を用いて制御モードを電源供給モードと負荷試験モードに切り換えることで、船内負荷への電源供給機能と船内発電機の負荷試験機能という異なる機能を併せ持つ。

電力変換装置の制御技術について、船内へ最大で5,000kVAの電源を給電する場合を例にして説明する。

##### 4.1 電源供給モードの制御

船内へ最大で5,000kVAの電源を給電するために、1,667kVAの電力変換装置を3台並列（コンテナハウスを3棟並列）で運転する。

電源として次の機能を持っている。

- (a) 船内電気設備が軽負荷の場合は、電力変換装置を3台並列運転から2台並列運転に移行して効率的な運用を行う。
- (b) 電力変換装置が故障した場合は、故障した装置を解列し、ほかの健全な装置で運転を継続する。

(c) 船内発電機から本設備、または本設備から船内発電機への無瞬断給電切替えを行う。

3台並列の電力変換装置が負荷を分担して安定に運転するために、各電力変換装置は負荷電流から有効電力成分と無効電力成分を算出する。有効電力成分に反比例して出力電力の周波数を低下させるドループ制御と、無効電力成分に反比例して出力電圧を低下させるドループ制御とを組み合わせ、並列間の負荷をバランスさせている。

電力変換装置間の並列投入と解列においては、運転中の電力変換装置に対して負荷の急変が発生しないように、負荷バランスを緩やかに制御する自動負荷移行制御を行っている。図7に、電源供給モードにおける電力フローを示す。商用（所内）系統から受電する50Hzまたは60Hzの6.6kVの電力をコンバータ1は直流に変換し、入力電流を力率1、ひずみ率5%以下で制御している。

コンバータ2で船舶側に、船内システムの周波数、電圧に変換して出力する。電力変換装置3台の負荷が均等になるように運転する。図8に、電力変換装置を2台とした場合の並列投入および解列時の波形を示す。1台運転から2台目が運転して並列投入となる際には、1台目に対して電圧並列準備中の2台目が電圧追従および周波数追従で同期を合わせる。同期後、遮断器が投入されると並列投入を行った2台目は電流を流すことなく並列状態となる。その後、並列投入時の電圧追従補正を緩やかに解除することで、並列投入号機は負荷を緩やかに分担し、並列間の横流は5%

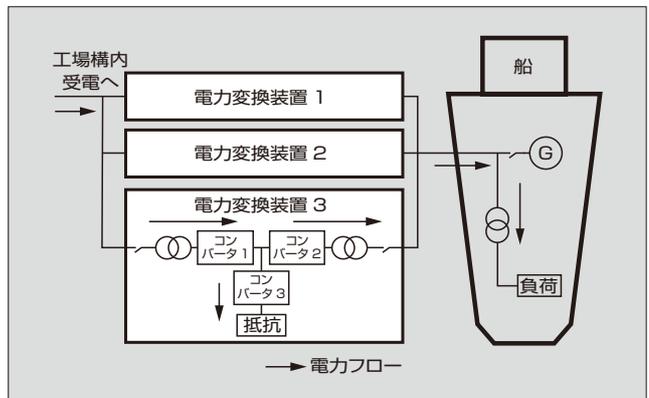


図7 電源供給モードにおける電力フロー

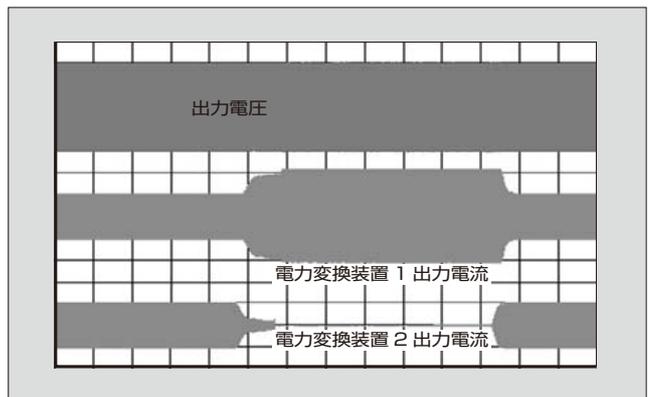


図8 並列投入および解列時の波形

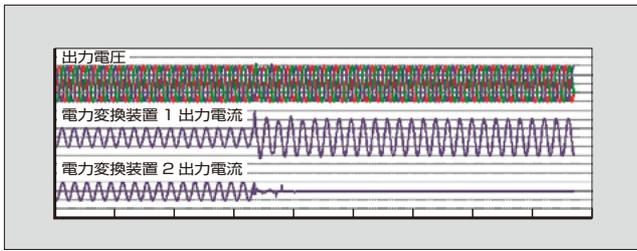


図9 2台並列運転時における1台故障時の波形

以内に整定する。図9に、2台並列運転において1台が故障した場合の波形を示す。2台で負荷を分担して運転している状態で1台が故障して停止した場合は、残りの運転中の電力変換装置で安定した給電を継続する。

#### 4.2 負荷試験モードの制御

負荷試験モードにおける電力フローを図10に示す。船内発電機の負荷試験を実施するために、制御モードを前述の電源供給モードから、コンバータ2が発電機出力電圧に連系し、電力と力率の指令に追従して制御を行う負荷試験モードに変更する。

図10に示すように、発電機からの電力は商用（所内）システムに回生されるため、従来のような抵抗器負荷でエネルギーを消費することなく試験が行える。しかし、電力会社への回生が行えない場合は、所内の電気設備で消費する必要がある。負荷試験を円滑に継続するために、コンバータ3を運転して抵抗で電力を消費する。また、発電機試験中に瞬停などの系統異常が発生した場合は、コンバータ1は連系を継続し運転する〔FRT（Fault Ride Through）機能〕。このため、システムに戻せない場合の電力はコンバータ3を運転して抵抗で消費する。

発電機負荷試験の負荷急変試験において、5,000 kVA を階段状に印加すると系統へ急激な逆潮流が生じ、電圧変動が発生する。このため、電圧変動が発生しないように回生電力を緩やかに変化させる機能を持っている。図11にそ

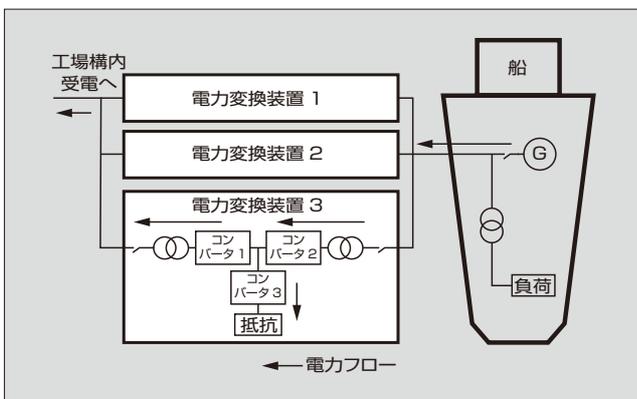


図10 負荷試験モードにおける電力フロー

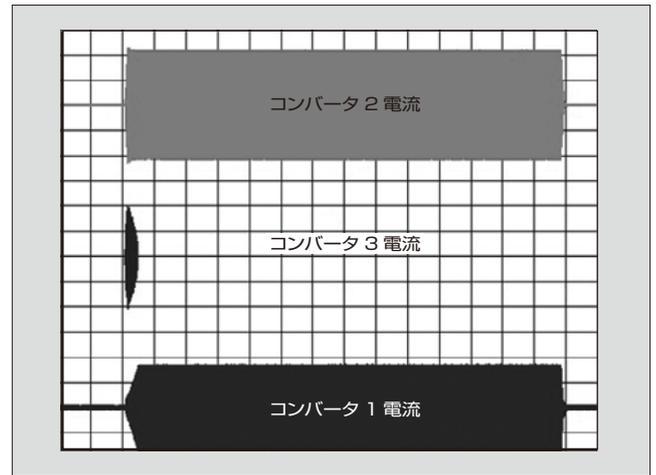


図11 負荷急変試験時の波形

際の電流波形を示す。コンバータ2は発電機負荷の急増に対応して動作し、コンバータ1は設定された電力変化率で電力を受電側に出力する。このとき余剰電力は、コンバータ3に接続された抵抗で消費することにより運転を継続する。

#### 5 あとがき

船内負荷への給電機能と船内発電機の負荷試験機能を併せ持った多機能陸電設備について、その構造および制御技術について述べた。本設備の適用拡大に向け、さらなる機能向上を図っていく所存である。



宮下 勉

電動応用プラントのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社産業インフラ事業本部産業プラント事業部産業技術第一部課長補佐。



梅沢 一喜

無停電電源装置、パワーコンディショナの開発に従事。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開発部課長。技術士（電気電子部門）。電気学会会員。



城市 洋

産業用インバータの開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部神戸工場パワエレ設計部課長補佐。

# パワーエレクトロニクス機器のシミュレーション技術

Simulation Technology for Power Electronics Equipment

松本 寛之 MATSUMOTO, Hiroyuki

玉手 道雄 TAMATE, Michio

吉川 功 YOSHIKAWA, Ko

パワーエレクトロニクス機器のさらなる高電力密度化、高効率化への要求が高まる中、これまで個別に行ってきた配線構造設計、冷却構造設計、EMI (Electromagnetic Interference) 設計を連係して開発することが重要になっている。富士電機は、デバイスシミュレーションモデルを用いた連係開発に取り組んでいる。このモデルを用いて、実装時のスイッチング特性を正確に把握し各設計に活用する。設計段階で部品温度やノイズの流出などを高精度で推定できるため、冷却構造やEMI フィルタをこれまでより短期間で開発することが可能である。

As there is increasing demand for higher efficiency and power density of the power electronics equipment, it has become more important to develop the equipment by connecting the design of wiring structure, cooling structure and electromagnetic interference (EMI), which were previously designed individually. Fuji Electric is working on the realization of such a connection by using a device simulation model. This simulation model makes it possible to understand the switching characteristics after the implementation into circuits. In addition, the simulation result can effectively be applied to the design of the other components. Since it is now possible to estimate the temperature of a component and an EMI noise level precisely at the beginning of the design stage, the cooling structure and EMI filters can be developed effectively shorter period than before.

## ① まえがき

富士電機は、太陽光発電、風力発電などの創エネルギーと、創ったエネルギーを効率よく使う省エネルギーの両方を実現するパワーエレクトロニクス (パワエレ) 技術をコア技術の一つとしている。パワエレ機器は、すでに幅広い用途に普及しているが、近年高まるエネルギー資源の有効利用への要求を満足するためには、これまで以上に高効率化と高電力密度化の実現が求められている。また、パワエレ機器の用途を拡大することにより多様化するお客さまの要求に応え、市場ニーズに合わせてタイムリーに製品を投入するためには、開発期間を短縮する必要がある。

富士電機は、さまざまなシミュレーション技術を駆使して製品を開発することにより、これらの要求に応えてきた。しかし、今後より高まる要求を満足するためには、シミュレーション技術のさらなる高度化が必要である。本稿では、これまで個別に行っていた配線構造設計、冷却構造設計、EMI (Electromagnetic Interference) 設計に関するシミュレーションの連係を可能とする、高精度なデバイスシミュレーションモデルを中心に述べる。本シミュレーション技術を活用することで、開発の初期段階で効率や機器の大きさを見極めるだけでなく、試作回数の削減による開発期間の短縮も実現できる。

## ② 機器設計におけるシミュレーション技術

### 2.1 パワーエレクトロニクス機器の主回路における設計要素

図1に、パワエレ機器の主回路における主な設計要素を示す。パワエレ機器は、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)、MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor

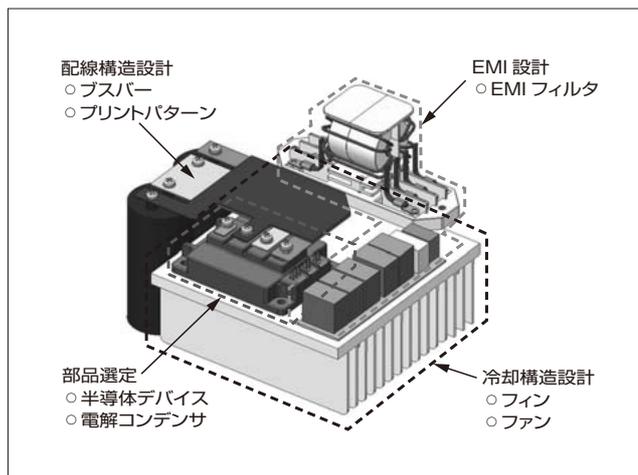


図1 パワーエレクトロニクス機器の主回路における設計要素

Field-Effect Transistor) などのパワーデバイスによる高速スイッチングにより、電気 (電圧、電流) を所望の形 (交流・直流、振幅) に変換する。パワエレ機器の主回路の開発においては、適切なスイッチングを行うための配線構造設計、デバイスの導通損失やスイッチング損失により生じる発熱を処理するための冷却構造設計、ならびに高速スイッチング時の電圧・電流変動に伴う電磁ノイズ障害を防止するためのEMI設計を組み合わせ、要求仕様を満足する製品を完成させる必要がある。

### 2.2 シミュレーションの構成

富士電機では、3種類の設計要素についてシミュレーションを活用している。図2に、機器設計におけるシミュレーションの構成を示す。図2(a)の従来のシミュレーションにおいては、シミュレーションにより各要素を個別に最適化しながら機器設計を行う。この際必要なパワーデバイ

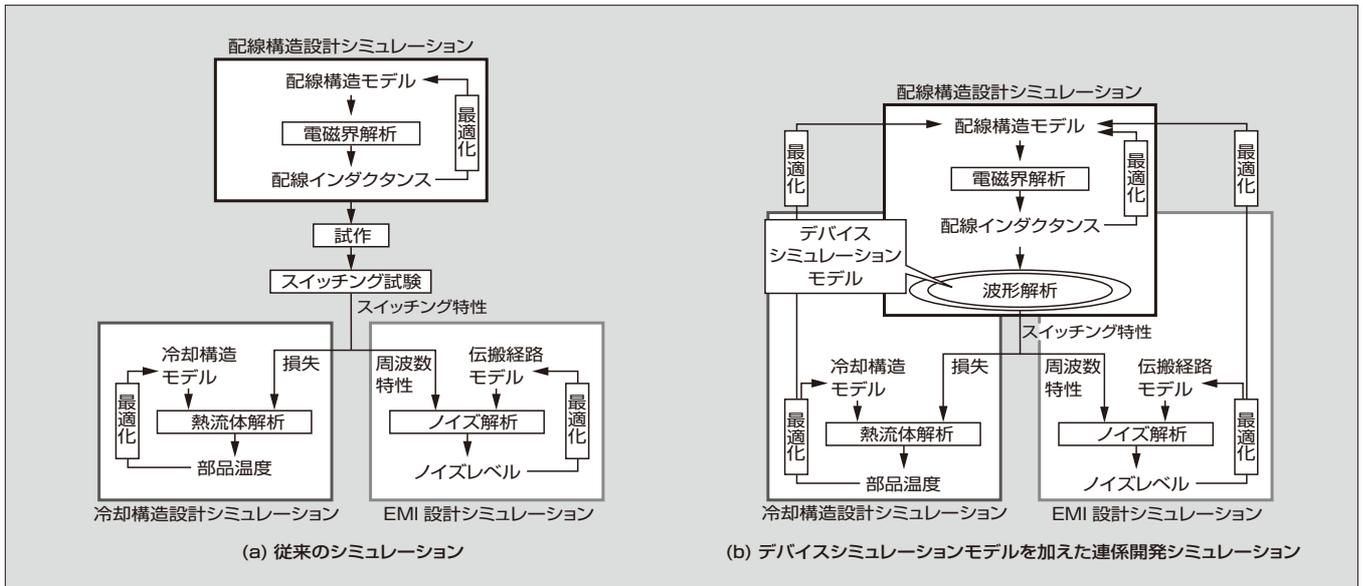


図2 機器設計におけるシミュレーションの構成

スのスイッチング特性（サージ電圧，損失）は，機器を試作して実験により求めていた。しかし，これらの各要素は相互に干渉して特性に影響するため，個別の最適設計が必ずしも機器全体としての最適設計になるとは限らない。そのため，パワエレ機器としての最適化は試作と評価の繰返しにより行わざるを得なかった。試作と評価の繰返しは，開発期間の長期化を招くだけでなく，ノウハウに依存する要素が大きいなど，高まる要求を満足することが難しくなっている。

したがって，設計段階で機器全体の動作を解析して，試作を伴わない機器設計が必要になる。これを実現するために，デバイスシミュレーションモデルを加えた連係開発シミュレーションの構成を図2 (b)に示す。デバイスシミュレーションモデルを中心に，3種類のシミュレーションを連係して活用できるようになる。このシミュレーションの構成は，実測を必要としないため，試作を伴わない機器設計が可能である。

### 3 デバイスシミュレーション技術

#### 3.1 従来のシミュレーションにおけるデバイス動作波形の解析

図2(b)に示したシミュレーションの構成を実現するためには，高精度なデバイスシミュレーションモデルの開発が不可欠である。デバイスの動作波形を解析する技術は以前から検討が進められており，大きく分けて2種類ある。しかし，次に示す理由によりパワエレ機器の設計に適用することが難しかった。

一つは，デバイスの電気的特性をフィッティングにより求めたビヘイビアモデルを用いて解析する技術である。この技術は，波形解析に一般的に用いられる回路シミュレータに標準的に実装されている。設定パラメータが比較的小さいため機器設計者にとって扱いやすく高速に動作する。

しかし，特定の動作条件では精度の高い解析ができるものの，ゲート駆動条件，温度条件などさまざまな条件で動作するパワエレ機器において，正確な動作波形を求めることは難しい。

もう一つは，デバイスの構造モデルや半導体物性に基づいて電界やキャリア密度の空間分布などの内部状態を解析し，その電気特性を求めるデバイスシミュレータの技術である。正確な解析ができるためデバイスの開発に使われるが，1回のスイッチング波形の解析時間が長くなる。そのため，スイッチングを何度も繰り返すパワエレ機器の動作を模擬する回路シミュレータとの連係解析には時間がかかり，パワエレ機器の設計への適用は難しい。

#### 3.2 デバイスシミュレーションモデルの原理

富士電機では，回路シミュレータで動作し，さまざまな動作条件で高精度な解析が可能なデバイスシミュレーションモデルを開発し，パワーモジュールの開発に活用している<sup>(1)</sup>。

今回開発したシミュレーションモデルは，内部の物理現象に即した等価回路モデルで構成している。IGBTのデバイス等価回路モデルを図3に示す。IGBTは図3(a)のような電気部品記号で示される。IGBT内部構造の等価回路モデルは図3(b)に示すように，PINダイオードとMOSFETを直列に接続し，各端子間にコンデンサを接続した構成となる。PINダイオードは，キャリア（正孔と電子）の濃度分布の勾配と，キャリアの再結合によって流れる電流が決まるため，それぞれ拡散電流と再結合電流を求めると電流を計算している。また，ドリフト層へのキャリアの蓄積と払出しが起るため，それによって流れる電流を求めるとターンオフ時のテール電流を計算している。MOSFETは，ゲート電圧に対するチャンネルの開き方から導電率を求め，電流を計算している。また，端子間容量はデバイス内部の構造と空乏層の幅から計算している。

これらの等価回路モデルに用いるパラメータをデバイスシミュレータの解析結果により決定することで、デバイス物性に基づいた電気特性を再現することができる。これにより、スイッチング条件（電圧、電流）、駆動条件（ゲート電圧、抵抗）、温度などを変化させても実際と一致するモデルが構築できる。

図4に、IGBT ( $T_j = 25^\circ\text{C}$ ) のスイッチング波形について実測値とデバイス等価回路モデルの計算値との比較を示す。スイッチング損失の誤差、すなわち実測値に対する

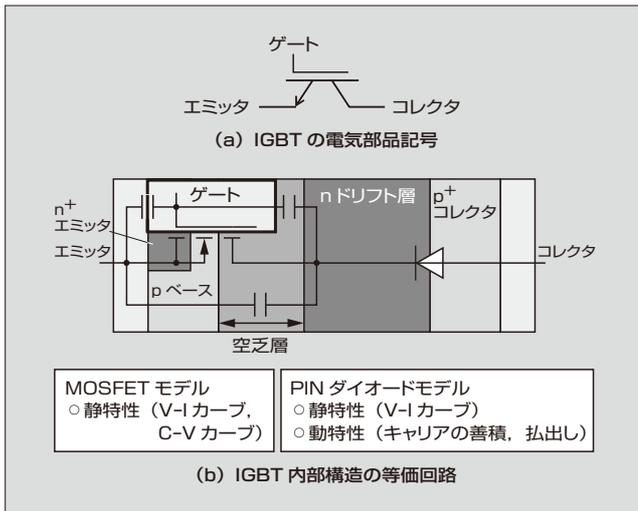


図3 IGBTのデバイス等価回路モデル

計算値の誤差は、ターンオフで5.4%、ターンオンで3.3%と高精度で解析ができています。また、電圧、電流の傾きやその寄生振動の周期が一致し、ピーク値の誤差も電圧で1.6%、電流で6.5%と実際の動作を精度良く模擬できている。

### 3.3 連係シミュレーションによる機器設計の例

前述のようにデバイスシミュレーションモデルを用いることで高精度にデバイスの動作解析ができるようになり、実測を伴わずに機器設計が可能となる。ここでは、このデバイスシミュレーションモデルを用いた、デバイスの選定と配線構造設計、冷却構造設計、EMI設計の事例について述べる。

#### (1) デバイスの選定と配線構造設計

デバイスの発生損失を低減して機器を高効率化するためには、デバイス的高速スイッチングが必要になり、デバイスの選定と配線構造設計を適切に行わなければならない。しかし、デバイスの種類や配線構造に対してスイッチング特性（サージ電圧、損失）は複雑に変化するため、最適な特性を得るためにはこれらの条件を変えながら詳細な実験によって評価する必要があった。

デバイスシミュレーションモデルを用いると、この複雑な変化を正確に模擬できるようになり、実機評価を伴わずにデバイスの選定と配線構造設計が可能となる。図4に示したスイッチング波形の測定に用いたものと同じIGBTを

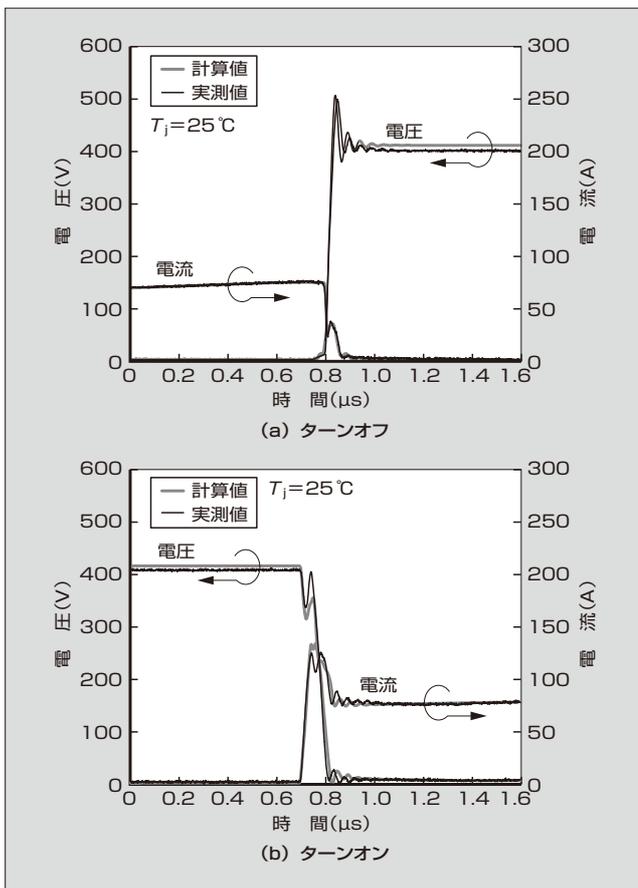


図4 IGBTのスイッチング波形

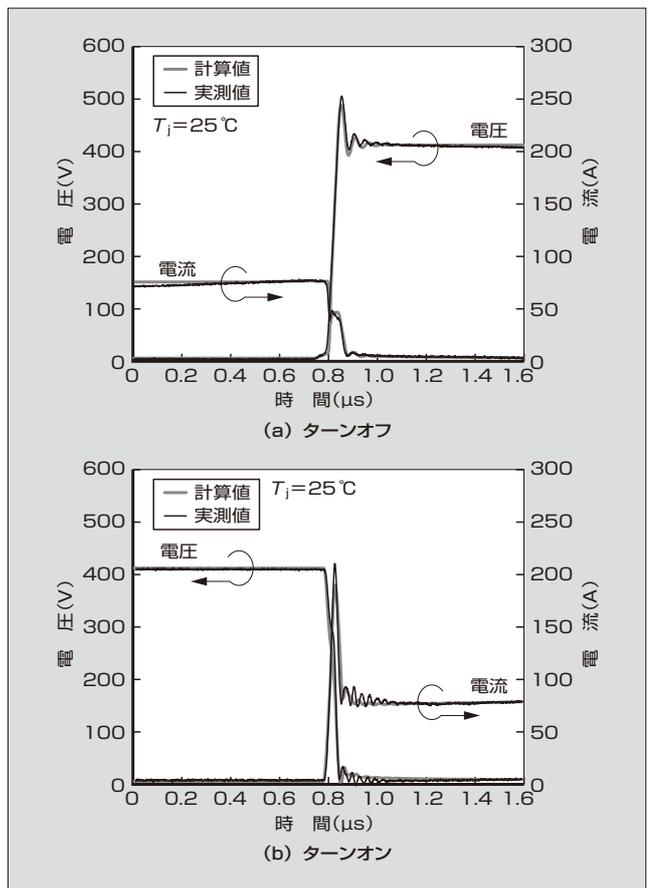


図5 IGBTを並列に接続した場合のスイッチング波形

用いて、IGBT を並列に接続した場合のスイッチング波形を図 5 に示す。デバイスに流れる電流や配線インダクタンスの影響によって、スイッチング波形は複雑に変化しており、スイッチング損失はターンオフで 30% 増加するものの、ターンオンでは 50% 減少した。デバイスシミュレーションモデルを使用することで、スイッチング損失の誤差はそれぞれ 0.6%、2.9% となり、従来技術では条件が変化すると誤差が 40% 程度に増加していたものを大幅に改善した。

(2) 冷却構造設計

パワエレ機器の多くの体積を占める部品の一つとして、冷却構造（フィン、ファン）がある。機器を小型化するためには、部品の発熱量や空気の流れを考慮して部品を配置し、小型で冷却効率が高い冷却構造の設計が必要である。

富士電機では熱流体解析を用いて、最適な部品配置を検討する解析手法を開発している<sup>(2)</sup>。部品配置を変更すると配線構造が変わるため、前述のとおりデバイスで発生する損失も変化する。従来はこの変化分をマージンとして設計に加味していた。しかし、デバイスシミュレーションモデルと熱流体解析を用いると、部品配置に応じた損失と温度を正確に解析でき、マージンの少ない設計が可能になる。

また、デバイスの損失は温度に依存するため、冷却能力に応じて発生する損失が変化してデバイスの温度も変動する。従来の冷却構造設計では、デバイスの発生損失はある温度（例えば  $T_j = 150^{\circ}\text{C}$ ）の損失を用いて解析すること

が一般的であったため、精度悪化の原因となっていた。図 6 に、デバイス損失の温度依存性を考慮した熱流体解析を示す。図 6 (a)のデバイス損失の温度依存性では、温度が高くなるほど損失が増加する傾向にある。図 6 (b)は、デバイスに流す電流を 48 A から 72 A へ、次に 60 A と階段状に変化させた場合のデバイスの温度上昇を示す。温度依存性を考慮しない場合は最大 7℃の誤差があるが、温度依存性を考慮することで 3℃にまで改善した。このようにデバイスシミュレーションモデルを用いることで、より精度の高い熱解析が可能になり、冷却構造の小型化や開発期間の短縮に貢献できる。

(3) EMI 設計

パワエレ機器では半導体デバイスのスイッチング動作における電圧、電流の急峻（きゅうしゅん）な変動がノイズ源となり、機器内部の寄生容量や空間を伝搬して電磁ノイズを放出する。これらのノイズを抑制するための EMI 設計を適切に行うことは機器の小型化だけでなく、信頼性向上にとっても重要となる。

富士電機では、機器の試作前に最適な EMI 設計を行える EMI 解析プラットフォームを構築している<sup>(3)</sup>。電磁界解析を活用することで、ノイズの伝搬経路のモデリングを行い、機器から放出されるノイズの成分を推定する。従来の EMI 解析は、実測波形から導出した各周波数成分の最大値をノイズ源として使用し、放出するノイズの成分を推定していた。

このプラットフォームにデバイス物理モデルを組み合わせることで、実機試作前に精度の高い推定ができるようになる。ノイズの流出は周波数成分ごとにその量が規制されている。ノイズ源となるスイッチング波形の周波数成分を正確に推定することができれば、より高い精度で EMI 設計を行うことができる。

図 7 に、図 4 (a)に示したターンオフ時のスイッチング波形の周波数特性を示す。実測値と計算値の周波数成分がおおよそ一致しており、実機を製作して測定しなくても高精度な EMI 設計の実現が期待できる。

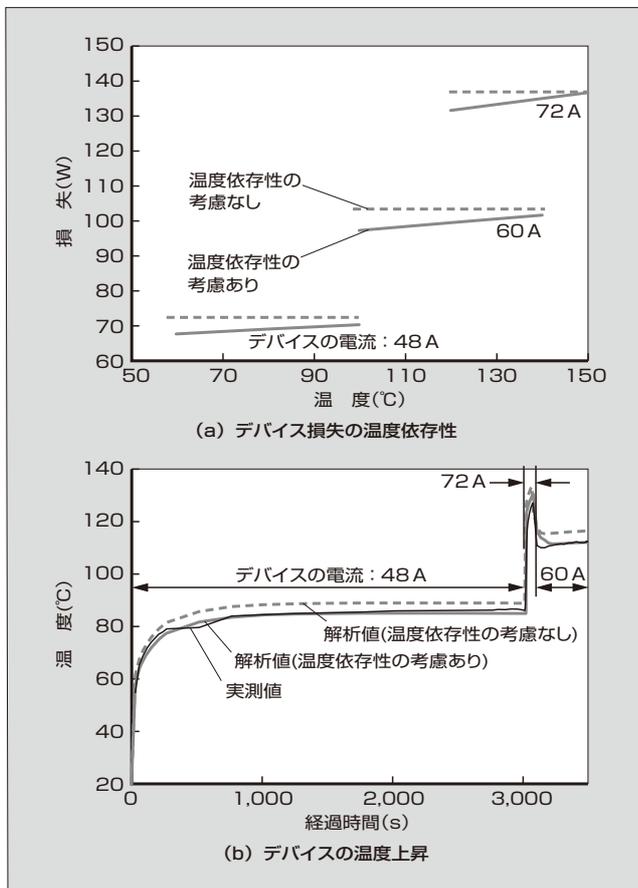


図 6 デバイス損失の温度依存性を考慮した熱流体解析

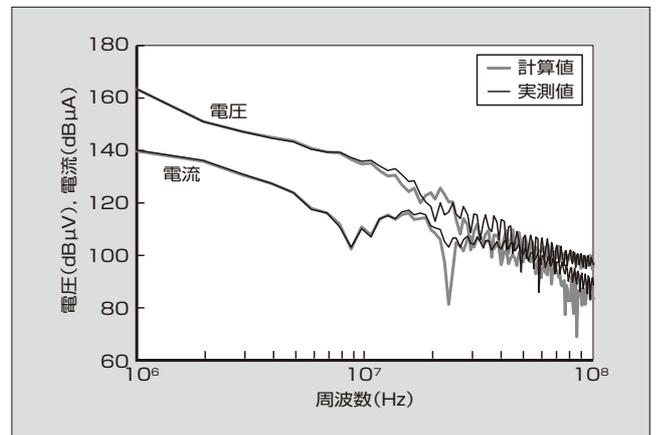


図 7 ターンオフ時のスイッチング波形の周波数特性

#### 4 あとがき

高精度なデバイスシミュレーションモデルをパワーエレクトロニクス機器設計に活用することで、試作を伴わずにより精度の高い設計が可能であることを示した。

今後は各シミュレーションツールの連携作業の簡略化を推進し、機器全体の最適設計を短期間に実現する機器設計技術を確立していく所存である。

#### 参考文献

- (1) 山田昭治ほか. IGBTモジュール開発におけるデバイス・回路・熱の連携シミュレーション技術. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.413-417.
- (2) 山本勉, 鳩崎芳久. 汎用インバータの熱冷却解析技術. 富士時報. 2007, vol.80, no.3, p.212-215.
- (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.



#### 松本 寛之

パワーエレクトロニクス機器の研究開発に従事。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電力変換技術開発部。電気学会会員。



#### 玉手 道雄

パワーエレクトロニクス機器の研究開発に従事。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電気制御技術開発部主査。博士（工学）。電気学会会員。



#### 吉川 功

半導体デバイスの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センター。



# パワーエレクトロニクス機器の国際標準化活動

## Standardization Activities for Power Electronics

高橋 弘 TAKAHASHI, Hiroshi

吉岡 康哉 YOSHIOKA, Yasutoshi

佐藤 以久也 SATO, Ikuya

国際規格には、ISO（国際標準化機構）、IEC（国際電気標準会議）、ITU（国際電気通信連合）で規定するものがある。富士電機は、以前からパワーエレクトロニクス機器に関する国際規格、特に IEC で規定する規格の策定活動を行ってきた。CISPR 国際標準化、太陽光発電システム EMC 製品規格標準化、可変速駆動システムの効率規格、および可変速駆動システムの機能安全規格対応などにおける活動は、日本がリードしている。また、2014 年の IEC 東京大会では、IEC ヤングプロフェッショナルプログラムテクニカルビジットを川崎工場に招致した。

Some international standards are established by the International Organization for Standardization (ISO), International Electrotechnical Commission (IEC) and International Telecommunication Union (ITU). Fuji Electric has been involved in activities to establish international standards regarding power electronics for a long time, especially those stipulated by the IEC. Japan is leading activities in areas such as CISPR international standardization, standardization of EMC products for photovoltaic power systems, efficiency standards of variable speed drive systems, and conformance of variable speed systems to functional safety standards. In the IEC General Meeting in Tokyo in 2014, we invited the technical visit of the IEC Young Professionals Programme to the Kawasaki Factory.

### 1 まえがき

国際規格には、ISO（国際標準化機構）、IEC（国際電気標準会議）、ITU（国際電気通信連合）で規定するものがある。1995 年に発効の WTO/TBT 協定により、国家規格（日本における JIS）は、国際規格に反しないことが要求されている。このため、国際規格はそれ以降、より重要になっている。パワーエレクトロニクス（パワエレ）機器は、電機機器であることから、特に IEC での国際規格化に深く関係し、現在、その審議が活発に行われている。また、輸出に当たって欧州の CE マークや米国の UL などに適合することが要求されてきている。このため、富士電機では、以前からパワエレ機器に関する国際規格に製品を対応させるための活動を行ってきた。

### 2 パワーエレクトロニクス機器に関する国際規格委員会と富士電機の活動

IEC においては、パワエレ機器は、TC（専門委員会）22 で規格の審議が行われている。日本において審議を担当する団体は、一般社団法人 電気学会である。この TC22 には、SC と呼ばれる分科委員会が存在し、現在、SC22E（安定化電源）、SC22F（送電用パワーエレクトロニクス）、SC22G（可変速駆動システム）、SC22H（無停電電源システム）が活動している。さらに、TC22 以外の専門委員会でもパワエレ機器に関する規格が作成されている。例えば、製品規格においては、TC2（電動機）、TC9（電車）、TC69（電気自動車）、TC82（太陽光）、TC106（燃料電池）などがあり、共通規格においては、TC77（電磁両立性）、CISPR（国際無線障害特別委員会）などがある。このように、パワエレ機器に関連する専門委員会は多い。

日本における新市場の創造や企業競争力の強化に資する“標準化”に関して、官民が連携して取り組むべき具体策を標準化戦略として策定するために、標準化官民戦略会議が開催された。その結果、2014 年 5 月 15 日に経済産業省において、標準化官民戦略のアクションプランが策定された。アクションプランでは、企業において標準化責任者である CSO（Chief Standardization Officer）を設置することを推奨している。富士電機では、CSO に相当する組織として経営層が参画する国際標準化委員会があり、国際規格への対応を戦略的に進めている。

### 3 国際規格審議の実例

最近のパワエレ機器に関する国際規格の審議について実例を示す。

#### 3.1 系統連系電力変換装置の直流端子高周波エミッションに関する国際規格制定（CISPR 国際標準化活動）

2005 年から、太陽光発電システムや燃料電池発電シス

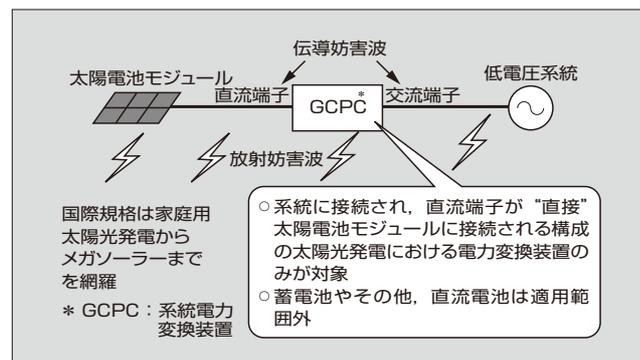


図1 CISPR11の改定方針

表1 CISPR11の改定経緯

年	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
CISPR*	予備期間		評価検証期間		規格作成期間		規格提案期間	
	○メンテナンスチーム発足	○方針提案 ○測定方法提案	○試験結果報告 ○規格化方針決定	○各国検証結果比較	○規格原案第1版発行	○規格原案第2版発行 ○投票用規格原案発行	○最終規格原案発行	○国際規格発行
国内対応	EMCC委託*2	NEDO委託*3	NEDO委託	METI委託*4	METI委託	MRI委託*5	MRI委託	
	○測定方法検討 ○予備データ取得	○測定方法検討 ○予備データ取得	○実データ取得 ○規格化方針検討	○各国実証試験 ○シミュレーション評価 ○規格案作成	○新規測定器作成 ○規格案検証試験	○シミュレーション評価 ○新規試験方法の検証	○太陽光以外の国際規格整備検討開始	○CISPR11*6第6版発行 ○第6版改訂審議開始

\*1 CISPR：国際無線障害特別委員会  
 \*2 EMCC：電波環境協議会  
 \*3 NEDO：独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構  
 \*4 METI：経済産業省  
 \*5 MRI：株式会社三菱総合研究所  
 \*6 CISPR11：国際無線障害特別委員会の規格（規格番号11）

テムに必須の系統電力変換装置（GCPC：Grid Connected Power Converter）による高周波電磁妨害国際規格CISPR11〔工業、科学、医療（ISM）向け高周波機器の電磁妨害の特性の許容値及び測定の方法〕の整備が日本主導で開始された。当時、既存のCISPR11を適用することが検討され、未整備となっていたGCPCの直流端子の伝導妨害波に対する限度値と測定方法の検討を行うこととなった。その結果、図1の方針に沿って太陽光発電システム用GCPCを対象にした電磁両立性要件をCISPR11に導入することが合意された。

表1に示すように、2008年に日本がリーダーを担当するメンテナンスチーム（MT-GCPC）がCISPRに設立され、富士電機は現在、そのリーダーを務めている。国内においては、一般社団法人日本電機工業会（JEMA）に専門の委員会（2014年は分散型電源EMC検討委員会）が設立され、委託事業として電機メーカーだけでなく、研究機関や認証機関も参加し、規格を整備するための実証試験を行ってきた。富士電機は、委員会会議に参加するとともに、図2に示すGCPCの交流端子および直流端子に対する伝導妨害波測定法実証試験の計画、準備、測定、評価解析の全てに積極的に貢献してきた。

### 3.2 太陽光発電システム EMC 製品規格（IEC TC82 における国際標準化活動）

IECの規定により、エミッション限度値やイミュニティ

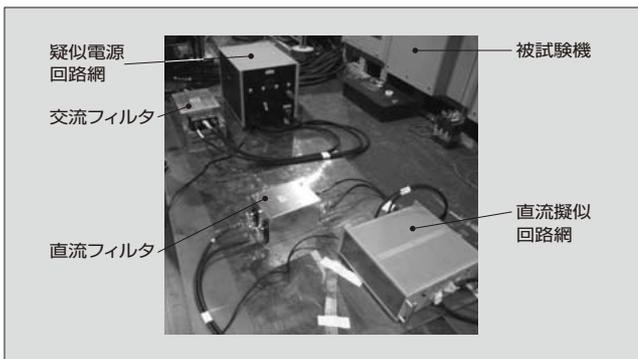


図2 GCPCに対する伝導妨害波測定法実証試験

要件、さらにその試験方法を定めたEMC基本規格の作成および改定は、TC77（電磁両立性：EMC）やCISPRが責務を持ち、太陽光発電システムの製品に関する専門委員会であるTC82は、自由に独自のものを作成できない。しかし、製品に関する専門委員会は、特定製品に対する規格に適合するための製品の要件や試験条件、試験手順を、製品規格として作成することができる。製品規格は、その運用に関して基本規格より優先順位が高い。

そこで、2012年10月のIEC TC82の国際会議において、日本から、太陽光発電システムに用いる電力変換装置に対するEMC製品規格の制定を提案した。さらに、2013年の6月と10月の国際会議において、GCPCに課せられる電磁放射や出力高調波などのエミッション要件（図3）、サージや静電気に対するイミュニティ要件（図4）、それらの適合性評価条件と試験方法など、具体的な規格制定方針について提案を行った。その後、2013年10月末に日本から提案書をIECに提出し、2014年1月期限の各国国内委員会による投票を経て提案が承認された。また、2014年2月にEMC製品規格IEC 62920を制定するための新しいプロジェクトチームの設立が承認された。リーダーは富士電機が務めている。

図5にEMC製品規格IEC 62920の審議工程を示す。CISPR11規格の改定や、TC77で検討が開始された低周波エミッション規格IEC 61000-3やイミュニティ規格IEC

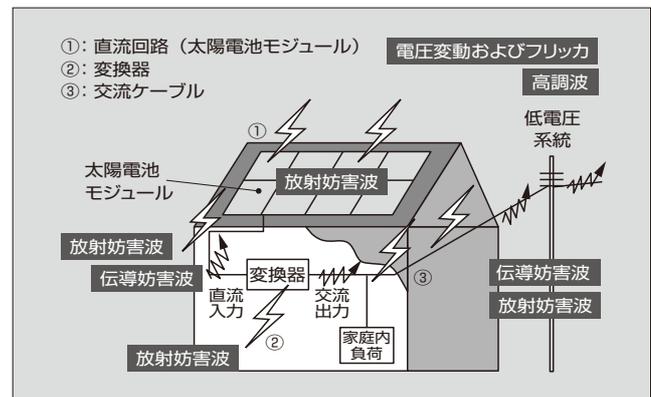


図3 エミッション要件

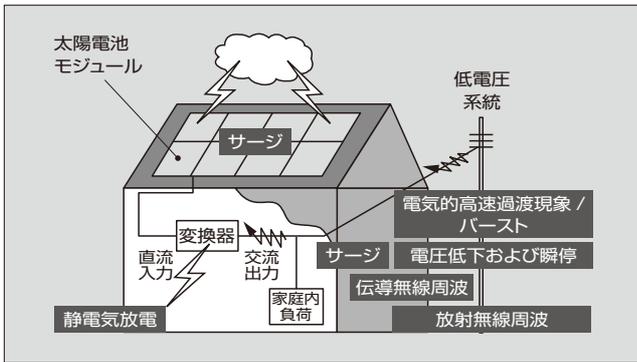


図4 イミュニティ要件

年	2014	2015	2016
CISPR 11*	投票用委員会原案	最終国際規格案	国際規格
IEC 61000-3	○TC77で検討および作成 ○SC77AとTC82の協同作業		
IEC 61000-4	○TC77で検討および作成 ○SC77AとTC82の協同作業		
IEC 62920	委員会原案	投票用委員会原案	最終国際規格案

\*CISPR11：国際無線障害特別委員会の規格（規格番号11）

図5 EMC製品規格IEC 62920の審議工程

61000-4の整備と協調しながら、2016年の規格発行を目指している。

### 3.3 可変速駆動システムの効率規格対応

欧州では、2014年にインバータとモータを組み合わせた可変速駆動システムの効率化に関わる欧州規格（EN 50598）が可決された。IECでは、この欧州規格を基にして可変速駆動システムの規格の作成が行われている。発行予定のIEC規格に整合したJISを作成する予定である。一方、日本では2015年度からモータについてトップランナー基準の適用が開始される。

富士電機は、2010年からJEMAにおいて可変速駆動システムのIEC対応分科会の主査を務め、工業会全体で国際標準化の取組みを主導し、IEC規格のエキスパートとして日本から提案を行っている。ここでは、可変速駆動システムにおける取組みについて述べる。

#### (a) インバータとモータ間の電力測定方法

図6に示すように、インバータとモータ間の電力測定方法において、欧米提案に対して日本の電源システムの事情を考慮した提案を行い、工業会全体で行った検証試験結果を基に等価であることを示し、いずれの測定方法でも可能とした。

#### (b) 効率検証試験

前述の日本提案の測定方法を含めた効率検証試験を、JEMA主催で2013年から3回にわたってインバータメーカー7社、測定器メーカー6社が合同で実施した。図7に効率検証試験の構成を示す。効率検証試験では

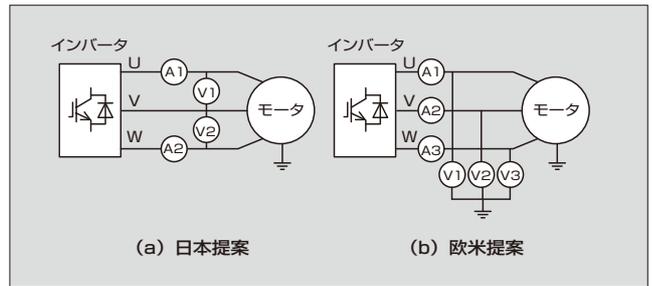


図6 インバータとモータ間の電力測定方法



図7 効率検証試験の構成

制御用インバータとして高精度ベクトル制御形インバータ「FRENIC-VG<sup>(1)</sup>」を採用した。測定対象であるモータやトルクメータに負荷用モータを接続し、負荷用モータをFRENIC-VGで駆動して電源に回生させる方法で各社のインバータや測定器を評価した。速度とトルクは、規格会議で審議されている8か所の測定点で行い、8か所のインバータ入力電力、出力電力、機械出力を電力計とトルクメータを用いて測定した。FRENIC-VGによる高精度トルク制御により、測定するインバータを変更してもトルクの再現性を確保し、短時間で高精度に測定できた。

### 3.4 可変速駆動システムの機能安全規格

近年、電気・電子プログラム機器の誤動作などで安全が脅かされる事故が起きており、機能安全<sup>(注)</sup>の考え方に基づく機器の設計が求められている。機能安全とは、許容が可能な程度までリスクを低減する安全機能を機器に持たせるものである。国際的な安全規格の体系は、ISO/IECガイド51で規定され、次の3層構造で定義される（図8）。

- (a) タイプA規格：基本安全規格
- (b) タイプB規格：グループ安全規格
- (c) タイプC規格：製品安全規格（分野別規格）

可変速駆動システムにおける機能安全規格IEC 61800-5-2は、製品安全規格に分類される。そして、このようなタイプC規格に該当する規格の場合には、その上位であるタイプA規格とタイプB規格も参照しなければならない。例えば、タイプA規格では、ISO 12100-1、ISO 12100-2、ISO 14121は当然考慮すべきものである。タイプB規格であるIEC 61508とISO 13849は、製品規格で多く引用されており、改定された場合に、製品規格は影響を大きく受け、試験方法などが変更になる。このIEC

<注> 機能安全：76ページ「解説1」を参照のこと

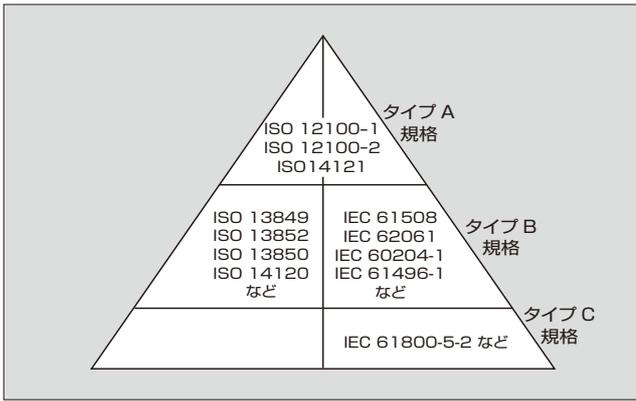


図8 ISO/IEC ガイド 51 による安全規格の体系

61508 は、電気・電子・プログラマブル電子の機能安全規格であり、マイクロコンピュータ制御を行っている機器が関係する。IEC 61800-5-2（可変速電気駆動システムの機能安全規格）は、この IEC 61508 のソフトウェアプロセス、診断機能など、多くを参照している。また、ISO 13849（機械類の安全性－制御システムの安全関連部）は、欧州では機械指令として定義されており重要である。

IEC 61800-5-2 では、ドライブ用の安全機能が 17 種類定義されている。これを大きく分類すると次の三つになる。

- (a) 回転を安全に制御するもの
- (b) 安全なモニタ信号（外部安全回路に使用できる速度のモニタ信号など）
- (c) 制限動作（速度の制限動作、トルクの制限動作など）

現在、IEC 61800-5-2 に適合した可変速駆動システムが普及しつつある。富士電機でも既に機能安全規格に適合したインバータを製品化している（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）。

IEC 61800-5-2 は、現在第二版の改定作業を実施しており、2016 年に発行される予定である。主な改定内容を次に示す。

- (a) IEC 61508 との用語の整合
  - (b) 機械系機能安全規格 ISO 13849-1 対応のためのガイドの追加
  - (c) 機能安全のための EMC 試験項目の規定の追加
  - (d) 機能安全のための環境試験の明確化
  - (e) 防爆規格対応の安全機能の情報の追加
  - (f) 診断間隔に関する目安および計算方法の要求の追加
- 特に、機能安全における EMC 試験の要求事項が追加され、試験基準が明確化される。このため、富士電機では IEC 国際エキスパートとして審議に参加して、審議動向をいち早く製品開発に反映させる取組みを行っている。

#### 4 IEC 東京大会における活動

年に一度開催されている IEC 年次総会が、2014 年は東京で 11 月 4 日から 11 月 15 日まで開催された。参加登録

人数は約 2,600 名（内、海外が 1,900 名<sup>(3)</sup>）と、多数の参加者があった。富士電機は、ゴールドスポンサーとして積極的に参加した。

##### (1) 技術展示会

富士電機は、会場の東京国際フォーラムにおいて 11 月 11 日と 12 日の 2 日間で展示を行った。この展示会では、パワーエレクトロニクス機器関連として汎用インバータ（FRENIC-VG, FRENIC-MEGA, FRENIC-Ace）の展示を行った。

##### (2) ヤングプロフェッショナルプログラム

IEC では将来の国際エキスパートを育てる若手育成プログラムとして、ヤングプロフェッショナルプログラム（YPP）を 2010 年から実施している。この YPP では、各国から選出されたメンバーが、年次総会の期間中に各委員会に参加して勉強や人脈構成を行う。富士電機では、第 1 期において日本代表メンバーを派遣し、また、今回の IEC 東京大会においても代表メンバーを派遣した。

また、経済産業省では YPP の日本版であるヤングプロフェッショナルジャパン（YPJ）を主催しており、今回の東京大会では YPP と YPJ の合同体として運営された。なお、この YPJ にも富士電機は第 1 期から参加しており、通算で 3 名を派遣している。

今回の YPP は、11 月 9 日から 12 日まで開催された。この最終日の午後に、企業を訪問して学ぶテクニカルビジットが開催され、その訪問先の一つとして富士電機の川崎工場が選定された。

このテクニカルビジットは、次の四つの内容で実施された。

- (a) 富士電機の紹介、ならびに日本および富士電機の規格活動の紹介
  - (b) 川崎工場における燃料電池、蒸気タービン、発電機の見学（図 9）
  - (c) パワーエレクトロニクスにおける規格動向の講演（図 10）
  - (d) 認証をテーマとしたグループディスカッション
- YPP と YPJ が三つのグループに分かれて認証についてディスカッションを行い、グループの代表者による発



図9 YPP メンバーの川崎工場訪問



図 10 YPP における講演

表を実施した。

このような活動を通して、富士電機では規格において社会に貢献してきている。これらが評価され、2013年には経済産業省から産業技術環境局長賞を2名が受賞（貢献賞と奨励賞）し、さらに2014年にはIECからIEC1906賞を受賞するなど、受賞実績を積み重ねてきている。

## 5 あとがき

パワーエレクトロニクス機器の国際標準化活動について述べた。今後も、各種規格の策定を通して国際標準化活動を強く推進していく所存である。

## 参考文献

- (1) 田中正男ほか. 高性能ベクトル制御形インバータ「FRENIC-VG」. 富士時報. 2012, vol.85, no.3, p.199-204.
- (2) 高橋弘. “ドライブ装置の機能安全機能”. 日本機械学会2012年度年次大会, No.G170014.
- (3) 経済産業省. “2014年IEC東京大会の概要（速報）について”. 2014年11月14日 ニュースリリース.



### 高橋 弘

パワーエレクトロニクス機器の研究開発および国際標準化活動に従事。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共通技術開発部主席。電気学会会員。



### 吉岡 康哉

パワーエレクトロニクス機器の研究開発および国際標準化活動に従事。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共通技術開発部マネージャー。博士（工学）。電気学会会員。



### 佐藤 以久也

パワーエレクトロニクス機器の研究開発および国際標準化活動に従事。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共通技術開発部主任。電気学会会員。



解説 1 機能安全

p.8, 73

形状や構造などの危険要因そのものを除去して安全を確保する本質安全に対して、コンピュータなどを含む機器が“機能が正常に動作する”ことで確保する安全を機能安全という。種々の機能を駆使して安全を実現することである。

IEC では、基本安全規格 IEC ガイド 104 に基づき、製品群ごとの安全規格が整備されており、パワーエレクトロニクス機器など電気・電子・プログラマブル電子の機能安全は IEC 61508 で規定されている。

解説 2 パワーデバイスの駆動条件

p.9

図 1 の IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 回路において、電流が流れている状態で IGBT をオフ (ゲートオフ) すると、電流がゼロに減少するとともに、それまでほぼゼロであった IGBT のコレクター-エミッタ間電圧  $V_{CE}$  は、回路電圧まで上昇するが、図 2 に示すように、主として回路に存在する寄生インピーダンスの影響により電圧が跳ね上がる。 $V_{CE}$  が素子の定格を超えると、素子破壊に至ることがあるので、素子と並列にスナバ回路を設けたり、回路の物理的な構造などを工夫して寄生インピーダンスを小さくすることで、この跳ね上がり電圧を抑制する。

また、図 3 のように対向アームの FWD (Free Wheeling Diode) に電流が流れている状態で IGBT をオンすると、電流が対向アームの FWD からスイッチオンした IGBT に転流すると同時に、対向アームの FWD の端子電圧が上昇 (逆回復) する。この時の電圧変化率  $dV/dt$  が大きいと FWD が破壊する可能性がある。

IGBT を使用する際は、このような現象を考慮して最適な駆動条件を設定する。

IGBT のスイッチングの速さの制御は、一般にゲート駆動信号 (電圧) がエミッター-ゲート間に存在する静電容量を充放電するときの電圧変化の速さを、ゲート端子に直列に接続するゲート抵抗の大きさを調節することで行う。一般にスイッチングを高速にするとスイッチング損失が小さくすることができるが、電流・電圧の変化率が大きくなった分、EMC (Electromagnetic Compatibility) の電磁放射 (ふくしゃ) が大きくなることがあるので、注意が必要である。

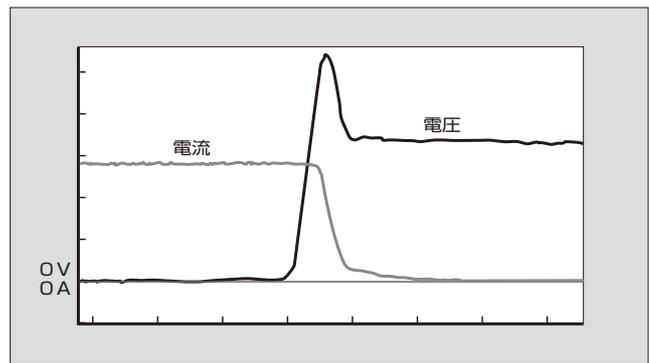


図 2 IGBT のオフ動作時の波形

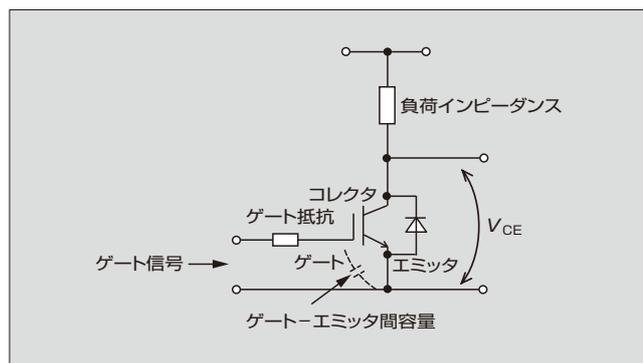


図 1 IGBT 回路

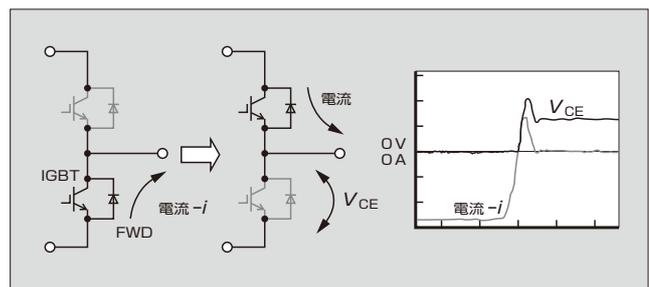


図 3 FWD の逆回復動作

解説3 パワーデバイスの発生損失

p.9

導通損失とスイッチング損失の和で表される(図1)。導通損失は半導体の接合部(PNジャンクション)に存在する電位差を電流が流れることによって発生し、電位差と電流の積で表される。スイッチング損失はスイッチング時の過渡状態でパワー半導体の端子間に発生する電圧と電流の積によって発生する損失で、スイッチング1回当たりの損失は電圧・電流積の時間積分で表される。

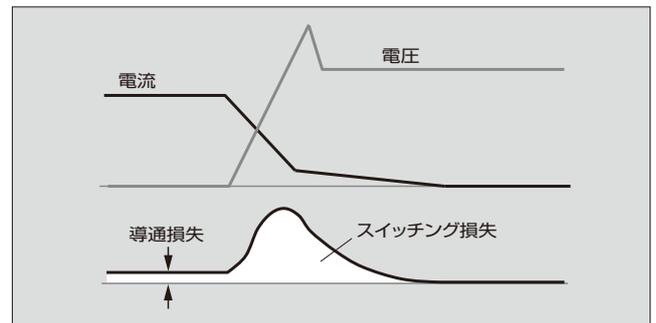
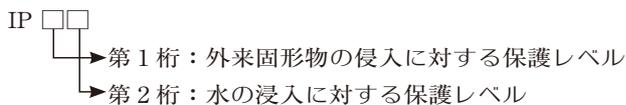


図1 IGBT をオフしたときのスイッチング波形とスイッチング損失

解説4 IP

p.10, 38

International Protection の略である。IP に続く 2 桁の数字の組合せて保護の種類とレベルを規定している。IEC 60529 Degrees of protection provided by enclosures (IP Code) では、次のように規定している。



第1桁のうち、1 および 2 は手や指を想定しており、人体保護の側面も持っている。

表1 保護等級の番号と定義

	第1桁	第2桁
0	保護なし	保護なし
1	直径50 mm以上の固形物が侵入しない(人の手の甲を想定)	垂直に落下する水滴が有害な影響を及ぼさない
2	直径12.5 mm以上の固形物が侵入しない(人の手の指を想定)	筐体を垂直から15度の範囲で傾けたときに垂直に落下する水滴が有害な影響を及ぼさない
3	直径2.5 mm以上の固形物が侵入しない	垂直から60度の範囲で噴霧された水が有害な影響を及ぼさない
4	直径1.0 mm以上の固形物が侵入しない	全方向からの水しぶきが有害な影響を及ぼさない
5	動作に影響するレベルの粉じんが侵入しない	全方向から水流を当てられても有害な影響を及ぼさない
6	粉じんの侵入がない	全方向から強力な水流を当てられても有害な影響を及ぼさない
7	-	一時的に水没しても、有害な水の浸入がない
8	-	継続的に水没しても、有害な水の浸入がない

解説5 SIL

p.10

Safety Integrity Level の略である。安全度水準を示し、対象となるシステムの安全機能に必要な信頼性のレベルを示す。安全機能に要求される信頼度レベルが最も低い SIL 1 から最も高い SIL 4 までの4段階に分けられる。IEC 61508-1 では、低頻度の動作が要求される場合と高頻度または連続の動作が要求される場合について、それぞれ次のように定義されている。

表1 安全度水準の定義

SIL	低頻度動作要求 <sup>*1</sup>	SIL	高頻度作動要求または連続モード <sup>*2</sup>
4	10 <sup>-5</sup> 以上10 <sup>-4</sup> 未満	4	10 <sup>-9</sup> 以上10 <sup>-6</sup> 未満
3	10 <sup>-4</sup> 以上10 <sup>-3</sup> 未満	3	10 <sup>-8</sup> 以上10 <sup>-7</sup> 未満
2	10 <sup>-3</sup> 以上10 <sup>-2</sup> 未満	2	10 <sup>-7</sup> 以上10 <sup>-6</sup> 未満
1	10 <sup>-2</sup> 以上10 <sup>-1</sup> 未満	1	10 <sup>-6</sup> 以上10 <sup>-5</sup> 未満

\*1: 要求機能の達成に失敗する平均確率を表す  
\*2: 単位時間当たりの危険な故障の確率を表す

解説6 3レベル電力変換方式

p.11, 20

3レベル電力変換方式について、インバータを例に説明する。3レベル電力変換方式のインバータ（3レベルインバータ）は、一般的な2レベル電力変換方式のインバータ（2レベルインバータ）に比べて多くのメリットがある。図1に示すように、2レベルインバータの変換器出力の電圧波形が、ゼロ点を中心とした $\pm E_d$ のPWM（Pulse Width Modulation：パルス幅変調）パルスとなるのに対し、3レベルインバータは、ゼロ点を中心とした $\pm E_d/2$ と $\pm E_d$ とのPWMパルスとなる。3レベルインバータの出力波形がより正弦波に近くなることから、出力波形を正弦波化するためのLCフィルタを小型化することができる。また、1回のスイッチ動作当たりの電圧変動幅が2レベルインバータの半分となるため、スイッチ素子に発生するスイッチング損失がおおむね半減し、装置から発生するノイズも低減する。これらの特徴がある3レベルインバータは、システムの小型化や高効率化の実現に有効である。

3レベルインバータの中で、図に示す直流電源の中間電位点（N）に結線されている方式をNPC（Neutral-Point-Clamped）方式と呼ぶ。これはスイッチ素子に印加される電圧が、常に直流電圧 $E_d$ の半分の電圧にクランプされることに由来する。

NPC方式に対してAT-NPC（Advanced T-type-NPC）方式は、直列に接続されたIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）がNPC方式で使用するIGBTの2倍の定格電圧であることと、直流電源の中間電位点（N）と直列に接続したIGBTの中間点（U）との間に結線される素子に、RB-IGBT（Reverse-Blocking IGBT）を用いることで回路を簡素化できる。電流の通過素子数が少ないため低損失化が実現でき、インバータを構成するときに必要なゲート駆動回路の電源数も低減できるメリットがある。

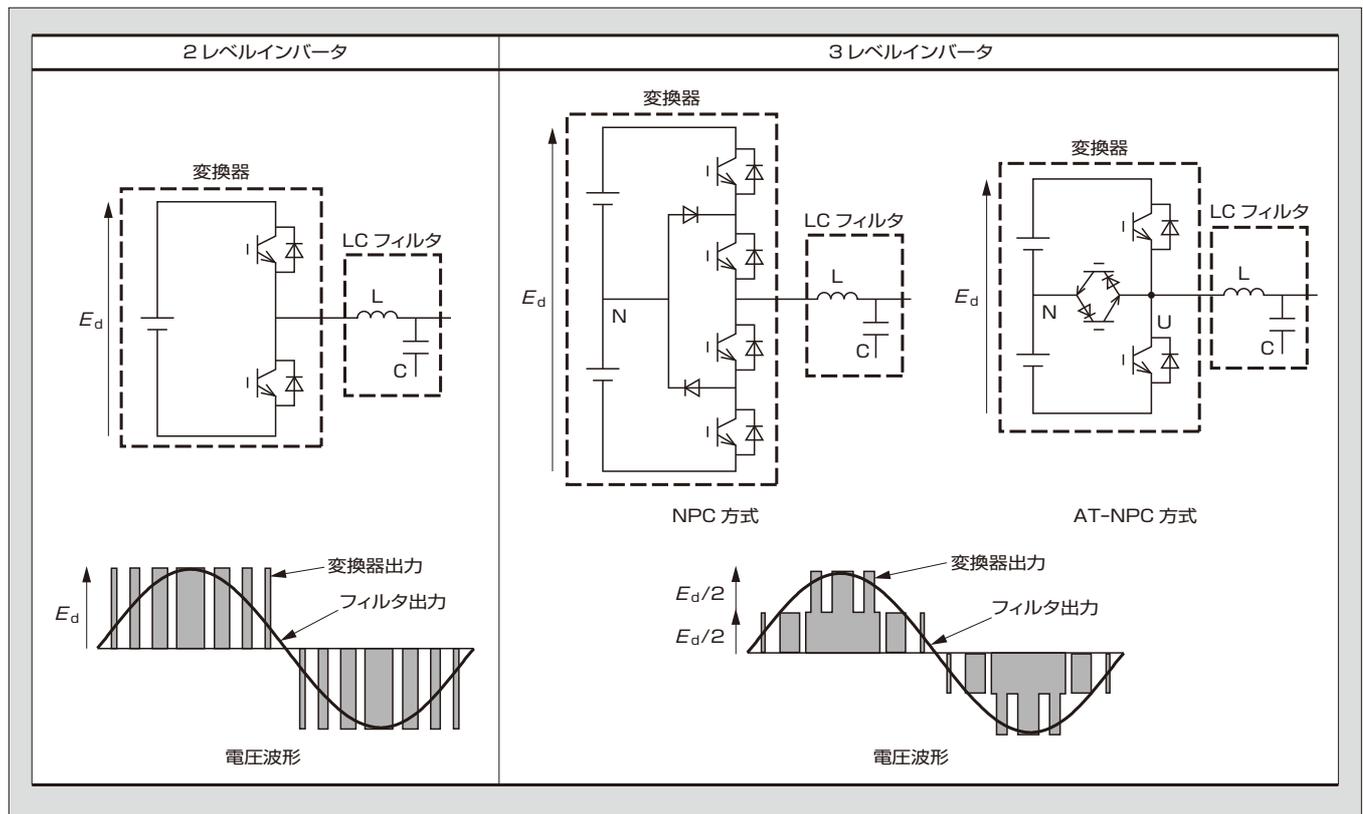


図1 2レベルインバータと3レベルインバータの回路および電圧波形

解説

# 国内向け高性能コンパクト型インバータ 「FRENIC-Ace」

High Performance Compact Inverter for Japanese Market “FRENIC-Ace”

篠田 誠司\* SHINODA, Seiji

国内では、工場設備や加工機械などのモータを駆動・制御し、機械の高性能化や省エネルギー（省エネ）を図るため汎用インバータが広く普及している。近年、業種や機械設備に応じて、最適な制御を行う専用機のニーズが高まっている。また、昨今の電気エネルギーの情勢を背景に、さらなる省エネへの関心が高まる一方である。

このたび発売した国内向け高性能コンパクト型インバータ「FRENIC-Ace」は、省エネ効果の大きい同期モータの駆動に対応している。さらに、汎用インバータでありながら、カスタマイズロジック機能を搭載しており、プログラマブルコントローラ（PLC）や外部の制御機器と組み合わせることなく、特定の用途にきめ細かく対応できる。省エネ用途だけでなく特定用途にも適用できる汎用インバータである。

## 1 特徴

FRENIC-Ace（図1）の主な特徴を次に示す。

### (1) 拡充したカスタマイズロジック機能の標準搭載

FRENIC-Aceでは、従来機種の「FRENIC-MEGA」および「FRENIC-HVAC」に搭載しているカスタマイズロジック機能を大幅に拡充し、標準で搭載した。従来は、ユーザの求める専用機能を、インバータ本体のソフトウ

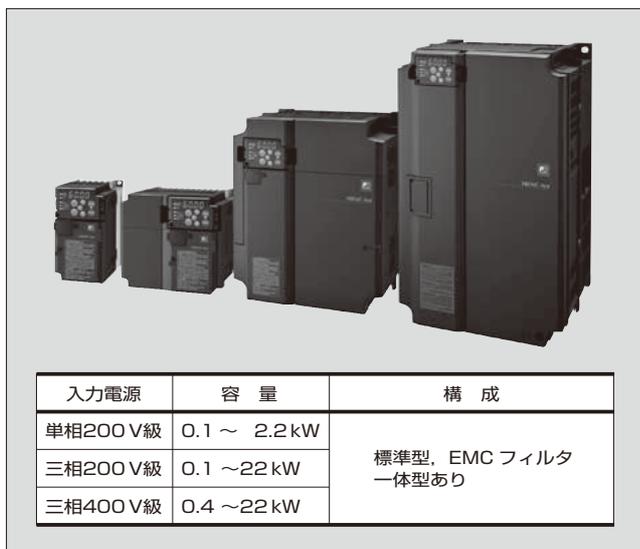


図1 「FRENIC-Ace」

ア機能を向上した特殊品や外部制御機器を用いて実現していた。FRENIC-Aceでは、カスタマイズロジック機能により、標準仕様のインバータ本体で実現できるようになり（図2）、ユーザ自身でプログラミングを行うことも可能になった。

カスタマイズロジック機能の適用例を図3に示す。天井からモータで重量物を巻き上げるホイストクレーンでは、つり上げる対象物の荷重に応じたモータの回転速度調節や、落下を防止するための機械ブレーキの作動とモータの駆動を連携して制御する。他にも伸線機や巻取機で



図2 「FRENIC-Ace」の特徴

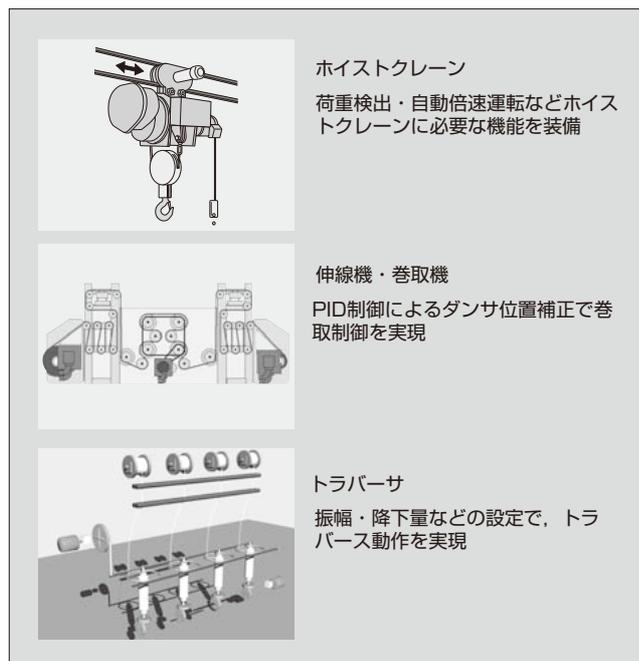


図3 カスタマイズロジック機能の適用例

\* 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開発部

用いられるトルクと速度の制御や、トラバーサの往復動作などがある。FRENIC-Aceでは、インバータ本体だけでこのような高度な制御が行えるようになった。

(2) 2種類の過負荷定格への適用

FRENIC-Aceは、重過負荷定格（HHD 定格）と軽過負荷定格（HND 定格）の2種類の負荷定格に適用できる。HHD 定格は、立体倉庫などにおいて高頻度で起動・停止を繰り返す上下搬送装置、食品加工・材料加工における高粘度材料の攪拌（かくはん）機や粉碎機、送り出しポンプなどの高始動トルクが必要な用途向けの定格である。HND 定格は、ファン・ポンプ、遠心分離機、コンベアなど穏やかな加速・減速動作、連続回転などの過負荷耐量をあまり必要としない用途向けの定格である。

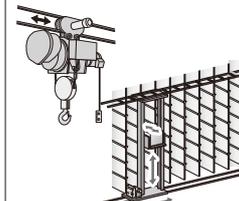
HND 定格向けには、従来よりも容量が1ランク小さいインバータを用いることができる。例えば、従来は18.5 kWのモータには同容量のインバータが必要であったが、軽過負荷用途では、容量とサイズが1ランク小さい15 kWのインバータが選択できる。ユーザからの要求が高い省コストおよび省スペースに応えるものである（図4）。

(3) 業界最小クラスのコンパクトサイズ

FRENIC-Aceは、業界最小クラスのコンパクトサイズを実現している。200V系列の0.75kW以下の容量では、従来機種「FRENIC-Multi」に対して幅寸法を15%縮小している。特に、複数台を使用する場合には、盤面占有率の縮小の効果により、制御盤や機械の大幅な小型化が可能である（図5）。

(4) 同期モータのセンサレス駆動方式への対応

同期モータのセンサレス駆動方式にも標準で対応して

適用モータ	 18.5kWモータ	
主な用途	搬送装置、上下搬送装置、高粘性液体ポンプ、攪拌機、包装機械など 	ファン・ポンプ、可変速コンベアなど  
過負荷耐量	150% 1min 200% 0.5s	120% 1min
FRENIC-Ace	HHD*1定格 18.5kW 	サイズダウン HND*2定格 15kW 

\*1 HHD : High carrier frequency Heavy Duty  
\*2 HND : High carrier frequency Normal Duty

図4 2種類の過負荷定格

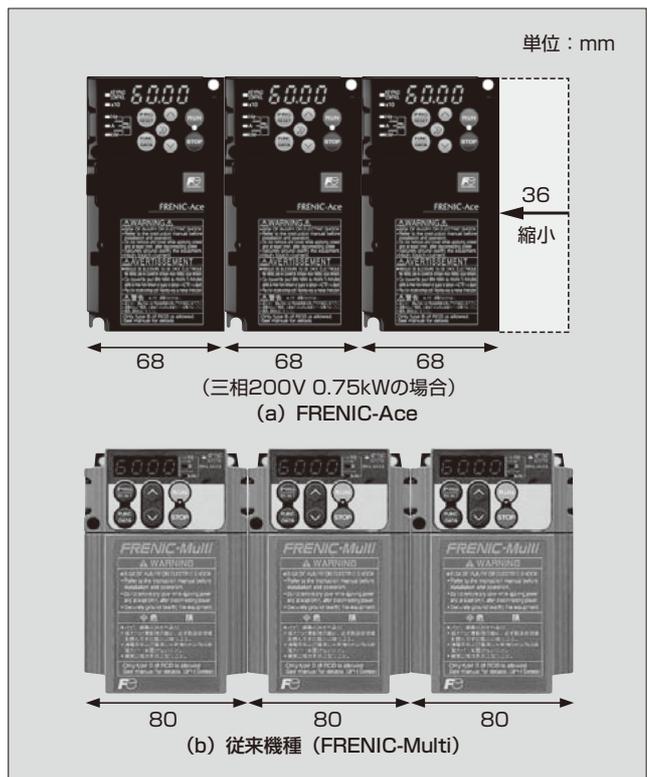


図5 「FRENIC-Ace」の幅寸法

いるので、さらなる省エネが求められる用途にも適用できる。

(5) 国際標準規格への適合

インバータは機械装置の一部として輸出されることから、国際標準規格に適合する必要がある。FRENIC-Aceでは、機能安全規格 IEC 61800-5-2/61508 (STO) にインバータ本体が標準で適合しており、従来機種では必要であった冗長化した主回路遮断回路（例えばマグネットコンタクト2個）が不要である。また、UL/cUL および CE マークにも標準で適合している。

(6) 拡張性に富んだオプションカード

表1に示すように、制御入出力拡張や各種通信などに対応できる多彩なオプションカードを用意した。コンパクトな製品でありながら、制御端子台基板を交換するタイプと追加で搭載するタイプの2種類のオプションカードを搭載でき、上位制御装置からの通信による制御と、

表1 オプションカード

PROFIBUS-DP*1	EtherNET/IP*2
PROFINET-RT*3	CANopen*4
DeviceNet*5	CC-Link*6
デジタル入出力拡張	アナログ入出力拡張
モータセンサ(PG)入力	RS-485マルチドロップ

\*1 PROFIBUS-DP : PROFIBUS User Organization の商標または登録商標  
\*2 EtherNET/IP : ODVA (Open DeviceNet Vendor Association, Inc.) の商標または登録商標  
\*3 PROFINET-RT : PROFIBUS User Organization の商標または登録商標  
\*4 CANopen : CAN in Automation の商標または登録商標  
\*5 DeviceNet : ODVA (Open DeviceNet Vendor Association, Inc.) の商標または登録商標  
\*6 CC-Link : CC-Link 協会の商標または登録商標

モータ側センサを利用したフィードバック制御やマスタースレーブ同期運転を同時に行うことができる。

## 2 背景となる技術

### (1) カスタマイズロジック機能

FRENIC-Ace のカスタマイズロジック機能では、インバータの設定パラメータ、モニタデータの読出し、ユーザ用パラメータの書き込み操作も扱えるようにした。上位コントローラと接続されている場合、各インバータでカスタマイズしたデータを共有し、連係動作を行わせることも可能となった。最大 200 ステップの大規模なプログラミングをユーザ自身が容易に行うことができるように、専用のプログラミング & デバッグツールも開発した。このツールでは、あらかじめ用意された機能ブロックを PC 画面上で配置・結線することで、プログラミングを簡単に行うことができる(図 6)。ロジックシンボルタイプには、論理演算、カウンタ、タイマ、算術演算、比較器、リミッタ、セレクト、ホールドなど、デジタル演算用とアナログ演算用の併せて 55 種類がある。デバッグは、各機能ブロックの入出力のオンラインモニタと波形トレースの 2 種類を用意している。

### (2) 機能安全対応

安全系回路の小型化、ならびに故障に至る時間(MTBF: Mean Time Between Failure) と故障検出率の向上を図るため、独自の回路方式と診断アルゴリズムを開発した。コンパクトクラスとしては初めて Cat.3 / PL: e, SIL3 に適合しており、ユーザによる、より高いレベルの安全システムが構築しやすくなっている。

### (3) オプションの共通化

従来、機種ごとにオプションを用意してきたが、インバータ本体のインタフェースを共通化したため、ユーザは購買・保守管理品種の削減が可能である。例えば、DeviceNet や PROFIBUS-DP などの通信オプションでは、FRENIC-HVAC など他の機種と共通で利用できる。

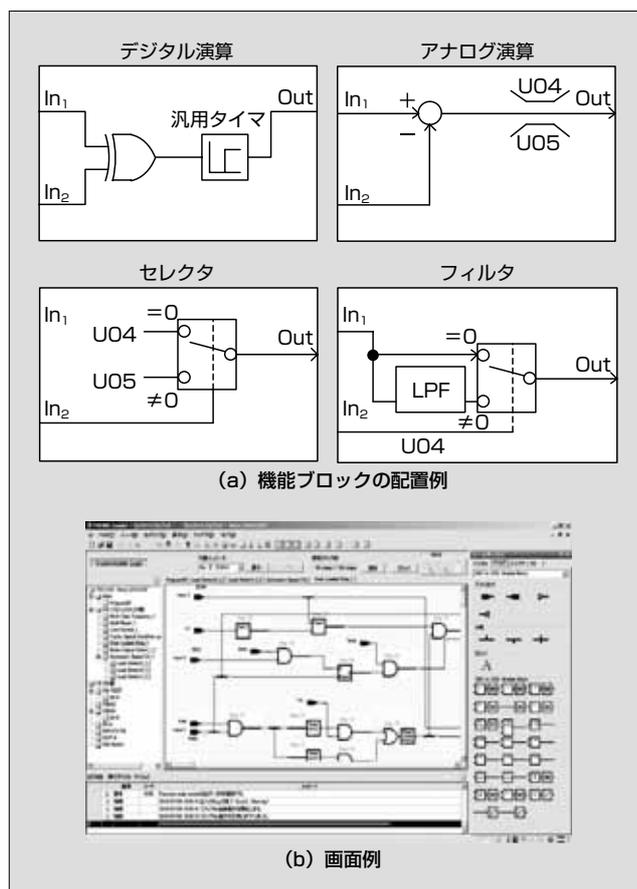


図 6 プログラミング & デバッグツール

### 発売時期

2014 年 8 月

### お問い合わせ先

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企画部  
 電話 (03) 5435-7190

## 略語（本号で使った主な略語）

APTA	American Public Transportation Association	(米国) 公共輸送協会
AT-NPC	Advanced T-type Neutral-Point-Clamped	
CCC	China Compulsory Certification	中国の製品安全認証制度
EMC	Electromagnetic Compatibility	電磁両立性
EMI	Electromagnetic Interference	電磁障害
FCPM	Flat Cup Permanent Magnet Motor	
FMECA	Failure Mode Effect and Criticality Analysis	故障モード影響解析
FRT	Fault Ride Through	
FWD	Free Wheeling Diode	
GCPC	Grid Connected Power Converter	系統電力変換装置
HDLC	High-level Data Link Control	ハイレベルデータリンク制御手順
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ
IP	International Protection	
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor	金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ
MTBF	Mean Time Between Failure	
PCS	Power Conditioning Sub-system	パワーコンディショナ
PLC	Programmable Logic Controller	
PTU	Portable Test Unit	
PWM	Pulse Width Modulation	パルス幅変調
RB-IGBT	Reverse-Blocking IGBT	逆阻止 IGBT
RPC	Railway static Power Conditioner	電力補償装置
SBD	Schottky Barrier Diode	ショットキーバリアダイオード
SIL	Safety Integrity Level	安全度水準
SVC	Static Var Compensator	無効電力補償装置
TPEC	Tsukuba Power Electronics Constellations	
UPS	Uninterruptible Power System	無停電電源装置
VVVF	Variable Voltage Variable Frequency	可変電圧可変周波数
WPT	Wireless Power Transfer	無線電力伝送

## 商標（本号に記載した主な商標または登録商標）

ANSYS Workbench	ANSYS Inc. および ANSYS Inc. の子会社の商標または登録商標
CANopen	CAN in Automation の商標または登録商標
CC-Link	CC-Link 協会の商標または登録商標
DeviceNet	ODVA (Open DeviceNet Vendor Association, Inc.) の商標または登録商標
Ethernet	富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標
EtherNET/IP	ODVA (Open DeviceNet Vendor Association, Inc.) の商標または登録商標
MODBUS	フランス Schneider Automation, Inc. の商標または登録商標
PROFIBUS-DP	PROFIBUS User Organization の商標または登録商標
PROFINET-RT	PROFIBUS User Organization の商標または登録商標

その他の会社名、製品名は、それぞれの会社の商標または登録商標である。

持続可能な社会のために。



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します。

**エネルギー技術を、究める。富士電機**

## 主要事業内容

### 発電・社会インフラ

環境にやさしい発電プラントとエネルギーマネジメントを融合させ、スマートコミュニティの実現に貢献します。

#### 発電プラント

火力・地熱・水力発電設備、原子力関連機器、太陽光発電システム、燃料電池

#### 社会システム

エネルギーマネジメントシステム、電力量計、スマートメーター

#### 社会情報

情報システム

### 産業インフラ

産業分野のさまざまなお客様に、生産ライン・インフラ設備に関わる「省エネ化」「ライフサイクルサービス」を提供します。

#### 変電

変電設備、産業電源設備

#### 機電システム

産業用ドライブシステム、加熱・誘導炉設備、工場エネルギーマネジメントシステム、データセンター、クリーンルーム設備

#### 計測制御システム

プラント制御システム、計測システム、放射線管理システム

#### 設備工事

電気・空調設備工事

### パワーエレクトロニクス

エネルギーの効率化や安定化に寄与するパワーエレクトロニクス応用製品を提供します。

#### ドライブ

インバータ・サーボ、モータ、EV（電気自動車）システム、輸送システム

#### パワーサプライ

無停電電源装置、パワーコンディショナ

#### 器具

受配電・制御機器

### 電子デバイス

産業機器・自動車・情報機器および新エネルギー分野に欠かせないパワー半導体をはじめとする電子デバイスを提供します。

#### 半導体

パワー半導体、感光体

#### ディスク媒体

ディスク媒体

### 食品流通

冷熱技術をコアに、メカトロニクス技術やITを融合し、お客様に最適な製品とソリューションを提供します。

#### 自販機

飲料・食品自販機

#### 店舗流通

流通システム、ショーケース、通貨機器

## 次号予定

富士電機技報 第88巻 第2号

特集 2014年度の技術成果と展望

### 富士電機技報企画委員会

企画委員長 江口 直也  
企画委員幹事 瀬谷 彰利  
企画委員 荻野 慎次 森岡 崇行 片桐 源一 根岸 久方  
八ツ田 豊 尾崎 覚 鶴田 芳雄 久野 宏仁  
須藤 晴彦 吉田 隆 橋本 親 眞下 真弓  
安納 俊之 大山 和則  
特集委員 尾崎 覚  
事務局 木村 基 小野 直樹 山本 亮太 柳下 修

## 富士電機技報 第88巻 第1号

平成27年3月20日印刷 平成27年3月30日発行

編集兼発行人 江口 直也

発行所 富士電機株式会社 技術開発本部  
〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目11番2号  
(ゲートシティ大崎イーストタワー)

編集・印刷 富士オフィス&ライフサービス株式会社内  
「富士電機技報」編集室  
〒191-8502 東京都日野市富士町1番地  
電話 (042) 585-6965  
FAX (042) 585-6539

発売元 株式会社 オーム社  
〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地  
電話 (03) 3233-0641  
振替口座 東京 6-20018

定価 756円(本体700円・送料別)

\*本誌に掲載されている論文を含め、創刊からのアーカイブスは下記URLで利用できます。

富士電機技報(和文) [http://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents\\_02\\_03.html](http://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html)

FUJI ELECTRIC REVIEW(英文) <http://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html>

\*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。

© 2015 Fuji Electric Co., Ltd. Printed in Japan (禁無断転載)

# 電気を止めない、ムダにしない。

**最新のパワーエレクトロニクス技術を駆使して、常にUPSを省エネで稼働させます。**

データセンターや工場の生産ラインなどの社会・産業インフラにとって、電気を一瞬も止められないことが常に求められています。各設備で電気を常時監視し、安定供給する使命を担うのがUPS（無停電電源装置）。24時間・365日の信頼性を極めるとともに、UPS自体の消費電力を抑える独自の技術で、省エネに大きく貢献します。世界中のビジネスと暮らしを、もっと身近なところで支えるために、富士電機のエネルギー技術の革新は止まりません。

---

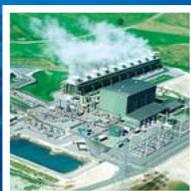
**富士電機のUPS**

---

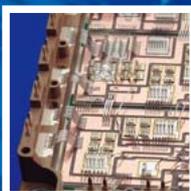
# Innovating Energy Technology

## エネルギー技術を、究める。

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します。



耐食・材料・熱水利用技術  
地熱発電プラント



デバイス技術  
IGBTパワー半導体



パワーエレクトロニクス技術  
メガソーラー向けPCS  
(パワーコンディショナ)



パワーエレクトロニクス技術  
インバータ



パワーエレクトロニクス技術  
UPS (無停電電源装置)



熱交換・冷媒制御技術  
ハイブリッドヒートポンプ式  
自動販売機

**F** 富士電機