昭和 40 年 6 月 3 日　第三種郵便物認可　平成 19 年 3 月 10 日発行（年 6 回 1，3，5，7，9，11 月の 10 日発行）富士時報　第 80 巻　第 2 号（通巻第 843 号）　ISSN 0367-3332

e-Front runners

# 富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

3
Mar. 2007
Vol. 80 No. 2

特集　産業分野で貢献する
パワーエレクトロニクス

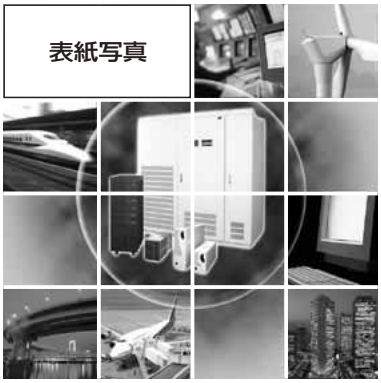
富士電機グループ

# 富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

## 特集 産業分野で貢献する パワーエレクトロニクス

表紙写真



パワーエレクトロニクス技術は，品質の高い電力の供給，周波数や電圧などが違う多様性のある電力の供給，さらに，電動機の回転速度制御などを目的としてさまざまな分野に応用されている。

例えば，鉄道，道路・空港など公共施設における電力の安定供給，コンピュータやオフィス機器への品質の高い電力の供給，風力など自然エネルギーから得られる電力の安定化，そして産業プラントにおける電動機の回転速度制御などにパワーエレクトロニクス技術を応用した装置が使われ，富士電機の納入例も多い。

表紙写真は代表的な応用装置である無停電電源装置とパワーエレクトロニクス技術の応用分野のイメージを配置し，その多様性と広がりを表現している。

## 目　次


環境とパワーエレクトロニクス技術 99（1）
久保田 寿夫

産業用パワーエレクトロニクスの現状と展望 100（2）
川村　逸生　・　笹川　清明

パワーエレクトロニクス装置設計の高度化技術 106（8）
滝沢　聡毅　・　徳田　寛和

鉄道車両・産業向けインバータの高性能化技術 110（12）
阿部　　康　・　田畑　壮章　・　松原　邦夫

産業プラントを支える可変速駆動システム 114（16）
安藤　俊明　・　木谷　剛士

環境改善・省エネルギー用高圧インバータ 120（22）
藤本　　潔　・　花澤　昌彦

世界最大級のアルミ電解用整流設備 124（26）
武藤　和弘　・　西條　　学　・　森山　琴也

フリッカ補償システムの最新制御技術 131（33）
宇都　克哉　・　篠原　　博　・　鈴木　明夫

誘導加熱用高周波インバータ 135（37）
倉田　　巌　・　亀田　　昇　・　三浦　敏栄

400 V 系高効率オンライン UPS「7000D シリーズ」 141（43）
福田　幸夫　・　日永田　守　・　幸林　久詩

高効率オンラインミニ UPS「GX200 シリーズ」 145（47）
松尾　浩之　・　大島　雅文　・　石井　紀好

情報通信を支える分散電源システム 149（51）
保高　伸洋　・　軽部　邦彦　・　多和田 信幸

鉄道車両におけるパワーエレクトロニクス技術 153（55）
井上　亮二　・　大庭　政利

自然エネルギーの発電出力安定化技術 162（64）
仁井　真介　・　神通川　亨

上下水道プラントのエネルギーマネジメントと パワーエレクトロニクス技術 166（68）
長倉　善則　・　安久津 信也　・　山本 総一郎

# 環境とパワーエレクトロニクス技術

**久保田 寿夫**（くぼた　ひさお）
明治大学理工学部教授

21 世紀に入ってから 7 年目を迎えている。21 世紀は環境の世紀と言われている。環境問題としては水質汚染や大気汚染の他に，温室効果ガスの排出やエネルギー大量消費などによる温暖化が深刻化しているように思われる。2003 年のヨーロッパの異常高温や 2005 年のアメリカのハリケーンなどは，温暖化の影響なのではないだろうか。温暖化を抑止するために，1997 年に京都で開かれた気候変動枠組条約第 3 回締約国会議（COP3）において，京都議定書が議決された。この議定書は 2005 年に発効した。日本も 1990 年を基準として $CO_2$ 排出量を 6％削減することになっている（目標年 2008 ～ 2012 年）。このような情勢にあって，環境問題に対してパワーエレクトロニクス技術の果たす役割は非常に大きく，また期待されるところである。

身近な製品では，エアコンの省エネ化は著しく，冷暖房能力 2.2 kW の製品の成績係数（COP）は 1997 年で 3.52 であったものが 2006 年では 6.62 に達しており，約 2 倍となっている（これらの数値はいずれもトップクラスの製品のものである）。省エネ化に貢献している技術の一部は埋込磁石界磁同期電動機（IPMSM）の採用とこれを磁極位置センサなしで駆動するセンサレス制御，さらに IGBT や MOSFET などのデバイスの低損失化・インバータの高効率化といったパワーエレクトロニクス技術である。エアコンと同じヒートポンプ技術を用いた電気給湯装置（エコキュート）はガス給湯装置に比べ，給湯光熱費が 1/6 程度で済むことから，急速に普及しつつある。また，エレベータなどのように電力回生が必須となる電動機駆動用途においては逆阻止 IGBT を採用した電力変換回路のマトリックスコンバータにより，更なる省エネ化と省スペース化が検討されている。

より環境に直結したイメージのあるものとして，太陽光発電や風力発電などのクリーンエネルギーおよびハイブリッドカーを含む電気自動車があげられる。

太陽光発電ではソーラーパネルで発電した直流電力をインバータにより交流電力に変換する必要がある。また，屋根の形状や大きさなどによりソーラーパネルの枚数などが制約されるため，複数の系統に分け，異なる電圧をインバータに入力するため DC-DC コンバータも必要となる。さらにできるだけ多くの電力をソーラーパネルから取り出し，商用電源と連携するための制御技術も必要となる。これら変換器部分全体（パワーコンディショナー）の変換効率は 94.5％程度になっている。クリーンエネルギーは風の強さや日照といった自然条件により著しく変動するため，電力の安定供給のためには二次電池や大容量キャパシタなどを利用したエネルギーバッファとパワーエレクトロニクス技術を用いた系統電圧の安定化も必要である。

ハイブリッドカーの代表格であるトヨタ自動車のプリウスでは通常のガソリン車に比べ，ガソリン消費量が 1/2 ～ 1/3 に抑えられ，$CO_2$ 削減に大いに貢献している。新車販売ランキングを見ると 2006 年 1 月には上位 30 位外であったものが，11 月には 5 位と躍進しており，急速に普及してきていることが分かる。ここでも IGBT インバータによる IPMSM の駆動制御というパワーエレクトロニクス技術が用いられている。

今後，利用の増加が期待できる環境対策製品としては，小容量のコージェネレーションシステムが考えられる。燃料電池やガスタービン・ガスエンジンで発電した電力に加え，廃熱を利用した給湯・暖房システムを構築し，エネルギー効率を 80％程度にすることが可能である。発電した電力を商用周波数に効率よく変換する必要があり，やはりパワーエレクトロニクス技術は必須である。

以上のように，パワーエレクトロニクス技術は環境問題解決のためには欠かすことのできない技術であり，本特集号がよりよい地球環境を維持するための一助となることを期待する。

# 産業用パワーエレクトロニクスの現状と展望

特集

川村　逸生（かわむら　いつお）　　笹川　清明（ささがわ　きよあき）

## 1　まえがき

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

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

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

(1)　エレクトロニクス技術

半導体（パワーと制御）とそれらの組合せ回路技術

(2)　制御技術

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

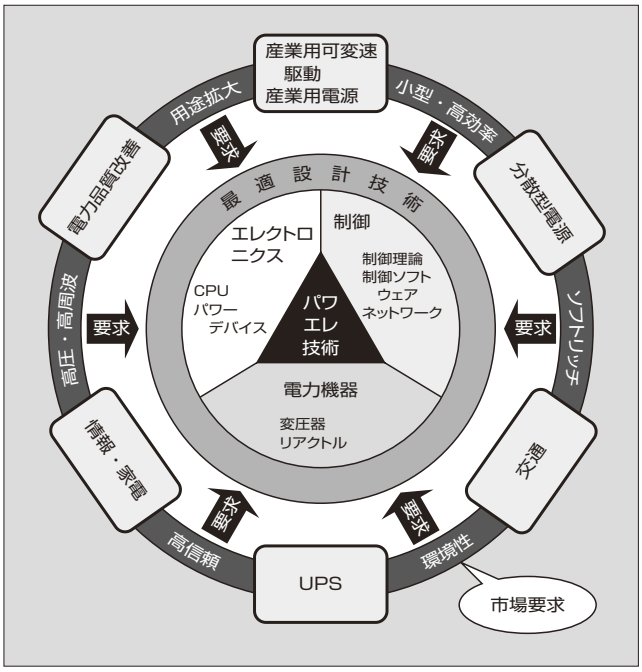
(3)　電力機器技術

変圧器，リアクトル，回転機のハードウェア技術

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

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

図1　パワエレ機器の開発方法の概念図




## 2　パワエレにおける設計ツール

### 2.1　ソフトウェアの高品質化への取組み

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

(1)　プログラム CAD（Computer Aided Design）

図面（ドキュメント）から実行可能なプログラムを自動

**川村　逸生**

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

**笹川　清明**

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

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

(2)　ソフトウェアプロセス管理技術

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

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

図 2　プログラム CAD の操作画面

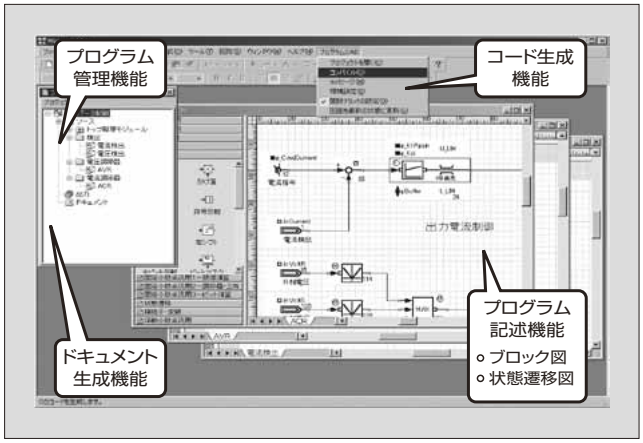
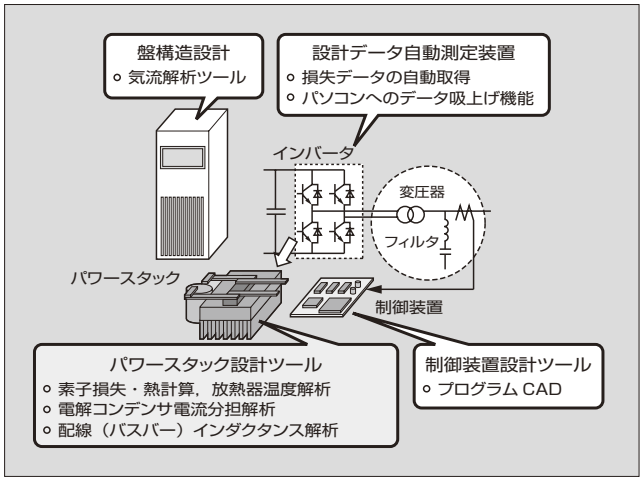



図 3　主回路シミュレーションツール




## 2.2　主回路設計技術

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

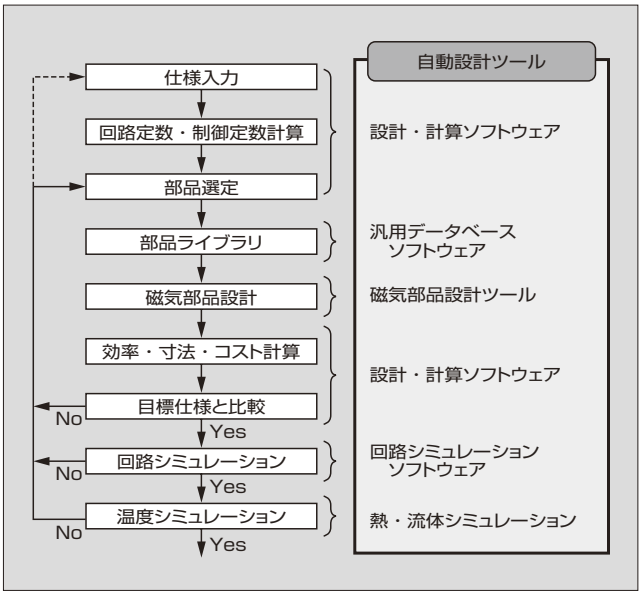
(1)　主回路シミュレーションツール

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

(2)　ユニット電源の自動設計ツール

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

図 4　自動設計ツールのフロー



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

## ③　市場動向と製品

### 3.1　産業用可変速駆動装置

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

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

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

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

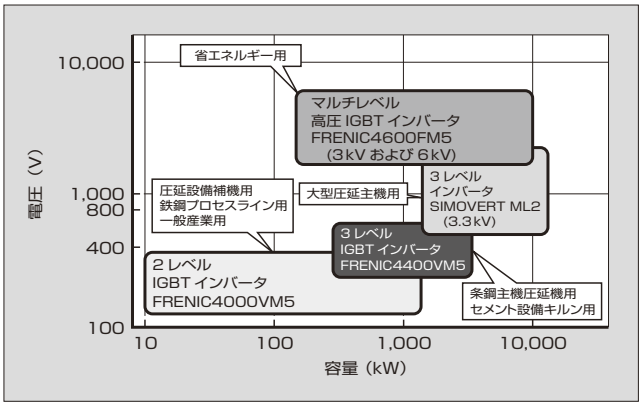
大型圧延主機へは 10 MVA 3.3 kV 3 レベルインバータを適用する。これはドイツのシーメンス社が製作し，日本国内で富士電機が販売している。鉄鋼や非鉄圧延主機へ適用しており，

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

の特長を有する。

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

図 5　インバータの適用マップ




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

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

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

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

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

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

### 3.2　UPS

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

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

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

図 6　UPS 系列マップ

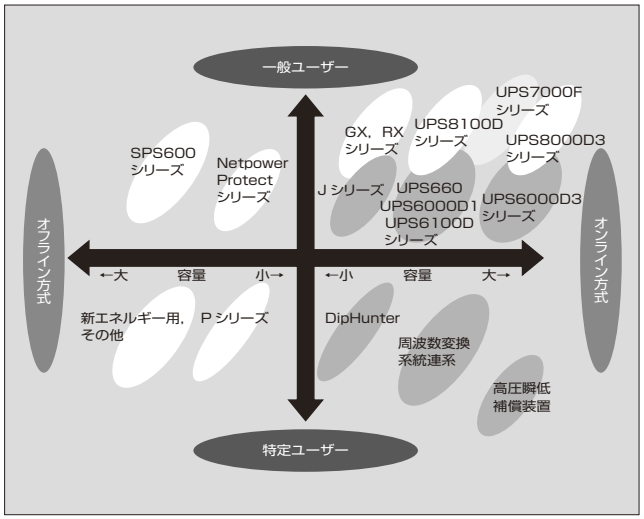
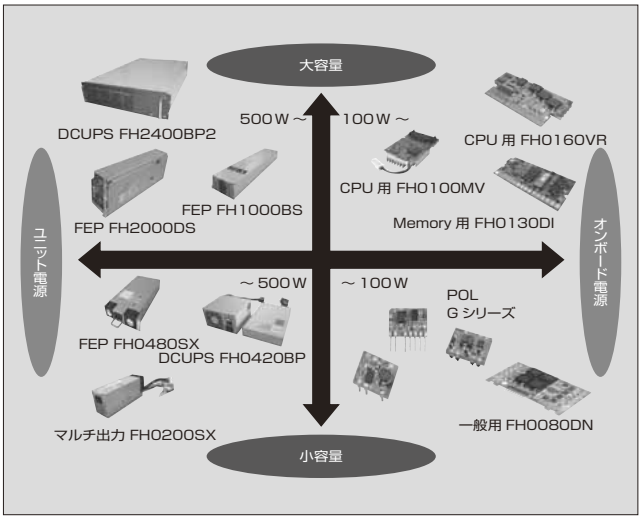



図 7　内部電源系列マップ




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

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

### 3. 3　分散型電源用変換装置

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

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

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

### 3. 4　産業用電源装置

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

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

(1)　$CO_2$ の排出量が少ない。

(2)　高速制御で応答が速く製品品質が向上する。

特集

図 8　高周波加熱電源の適用範囲

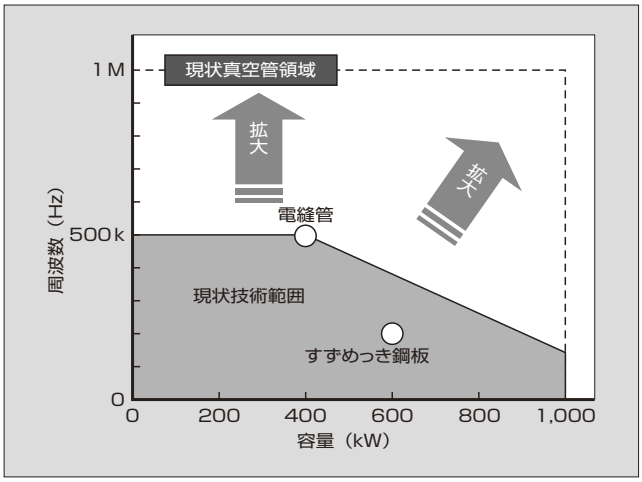
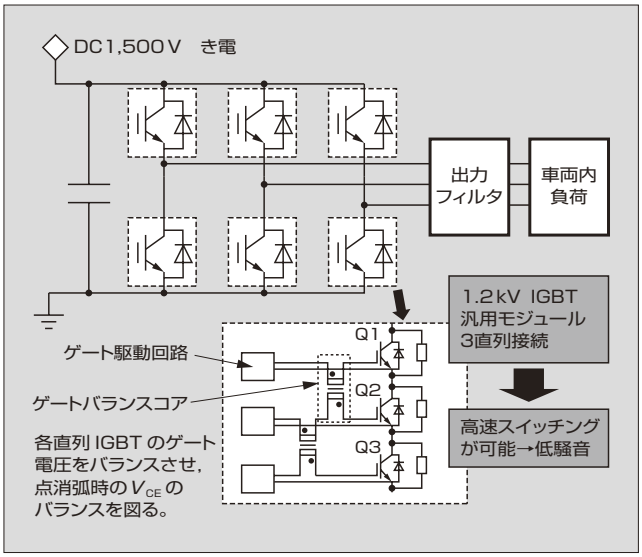



図 9　IGBT 直列接続の主回路方式




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

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

### 3.5　鉄道車両・地上設備用変換装置

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

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

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

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

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

## 4　あとがき

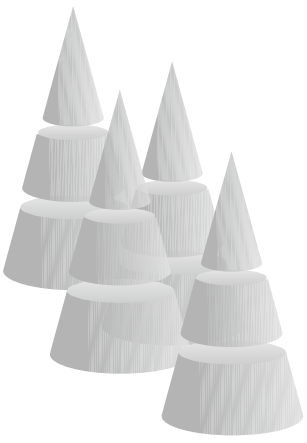
最近は電気が他のエネルギー（例えば，燃焼）に比べて環境性に優れていることから，電気への転換が今まで以上のスピードで進んでいる。さらに制御性がよいこともあって，電力・産業・輸送・通信・家電などの各分野で応用範囲が広がっている。

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

**参考文献**

(1)　井上亮二ほか．N700系新幹線車両用主回路システム．富士時報．vol.79, no.2, 2006, p.110–117.
(2)　二宮保ほか．総論．電気学会誌．vol.125, 2005, p.752–753.





# パワーエレクトロニクス装置設計の高度化技術

特集

滝沢　聡毅（たきざわ　さとき）　　徳田　寛和（とくだ　ひろかず）

## 1　まえがき

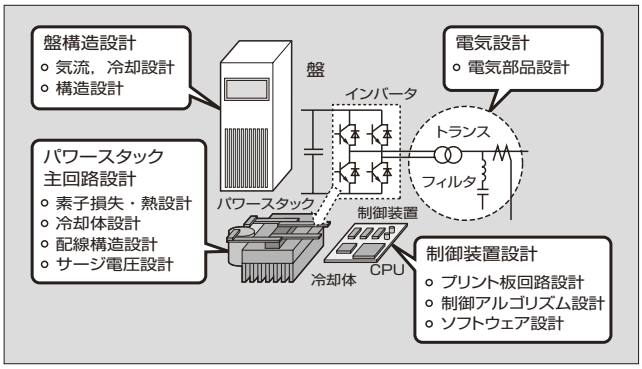
無停電電源装置（UPS）や各種インバータに代表されるパワーエレクトロニクス装置においては，小型化，高効率化，高性能化，および高信頼化の要望が非常に強い[(1)]。富士電機は，このような高品質なパワーエレクトロニクス製品をタイムリーに社会に供給することを企業使命としており，業界をリードしてきている。そして，これらの製品の開発設計は，最新の技術や専用設計ツールを駆使し，詳細にわたる解析検証を実施することにより実現している。

本稿ではその一例として，パワーエレクトロニクス装置の主回路部に適用するIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュールの発生損失とジャンクション温度を算定するシミュレーションツール，ならびに制御ソフトウェアをブロック図と状態遷移図の記述によって設計するCAD応用ツールを紹介する。これらの設計サポートツールは，富士電機が独自に開発したものである。

## 2　パワーエレクトロニクス装置の概要

**図1**に大容量のパワーエレクトロニクス装置の概略構成を示す。IGBTモジュールを中心としたパワースタックと，トランスやフィルタなどの周辺回路部，IGBTのスイッチングをコントロールする制御装置，およびこれらを収納する盤によって構成されている。

図1　パワーエレクトロニクス装置の概略構成



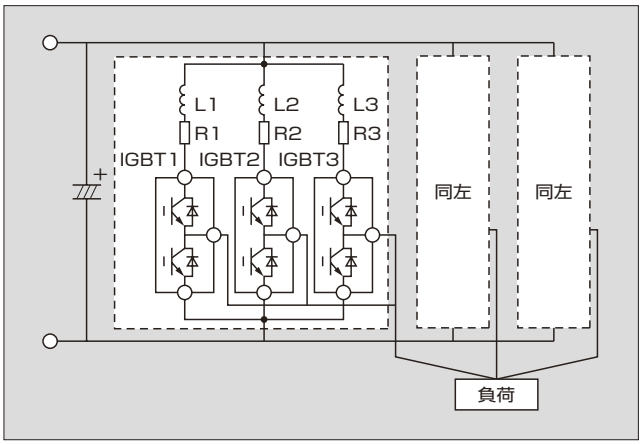

## 3　IGBTモジュール適用設計技術の高度化

### 3.1　IGBTモジュール適用設計における課題

一般にIGBTモジュールには絶対最大定格温度が規定されている。そのため，装置運転中のIGBTチップのジャンクション温度が，上記の絶対最大定格温度以下となるように設計する必要がある。ところが装置運転中においては，ジャンクション温度や，IGBTモジュール冷却用の放熱器の温度を正確に測定することが困難であり，また**図2**のように，装置の大容量化のためIGBTモジュールを並列接続した場合，IGBTチップ自身の温度特性や特性ばらつき，および配線構造上の不平衡（**図2**において，IGBT1～IGBT3への配線抵抗R1～R3や，同じく配線インダクタンスL1～L3の不平衡）によって，IGBTモジュールに流れる電流が均一化されない，といった設計上の課題が発生する。

そこでこれらの課題を解消し，IGBTモジュールを最適条件にて適用するためには，シミュレーション技術を最大限に活用することが有効となる。

図2　並列接続されたIGBTモジュールによるインバータ回路



**滝沢　聡毅**

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

**徳田　寛和**

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

図 3　IGBT モジュールの発生損失とジャンクション温度計算概略ブロック図

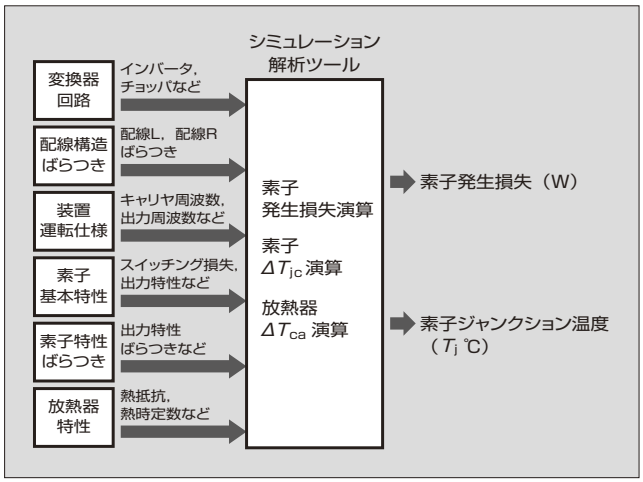
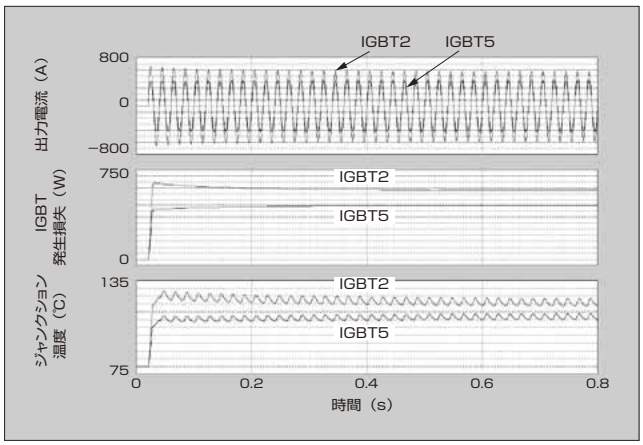



図 4　IGBT モジュールの出力電流・発生損失・ジャンクション温度解析結果




### 3. 2　IGBT モジュールの設計環境

**図 3** に IGBT モジュールの発生損失とジャンクション温度を計算するための概略ブロック図を示す。特に計算精度を上げるために，下記の内容も考慮のうえ，計算を実施していることが特徴である。

(1)　IGBT モジュールを並列接続した場合の，素子特性ばらつきや配線構造の不平衡を考慮した電流分担率計算

(2)　素子の出力特性やスイッチング損失特性の温度依存性を考慮した発生損失計算

(3)　モジュールのチップ位置を考慮した放熱器の温度分布計算

具体的には，発生損失，ジャンクション温度解析ツールに対して，下記(a)〜(f)の項目を入力し，計算を行っている。

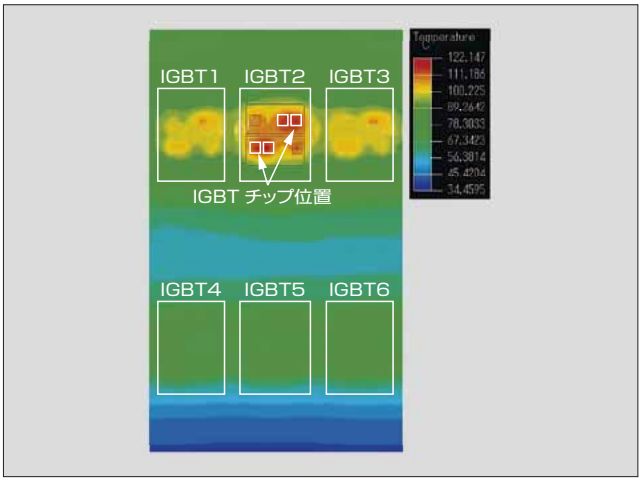
(a)　変換器回路，IGBT モジュール並列数

(b)　主回路配線の構造（配線インダクタンス，配線抵抗[(2)]）

(c)　装置の運転仕様（キャリヤ周波数など）

(d)　素子基本特性（出力特性，スイッチング損失データ）

図 5　放熱器ベース面の温度分布シミュレーション結果




(e)　素子特性ばらつき（出力特性ばらつきなど）

(f)　放熱器温度分布の解析結果

### 3. 3　解析結果

**図 4** に IGBT モジュールを 6 並列接続したパワースタックを例に，IGBT モジュールの出力電流，発生損失，およびジャンクション温度の解析結果を示す。IGBT モジュールについては，特性ばらつきの最悪ケースを想定し，6 並列のうち 1 モジュール（IGBT2）に電流が集中するような出力特性を設定した。IGBT チップは正の温度出力特性を有しているため，時間経過とともに徐々に電流の不平衡率が解消されているのが分かる。

設計段階においてこのような現象や特性をとらえることで，装置の小型化実現のための最適な IGBT モジュールの選定が可能となる。

また**図 5** には，モジュール内部のチップ位置を考慮した放熱器ベース面の温度分布シミュレーション結果を示す。電流が集中している IGBT2 モジュールの IGBT チップ部が発熱し，高温になっていることが分かる。

本設計環境によって，IGBT に流れる電流の不平衡現象と，本不平衡現象に基づいた放熱器からジャンクションまでの温度分布，および IGBT モジュールからの発生損失が設計段階で，より高精度，正確に把握可能となる。その結果，より一層の装置の小型化や高信頼化，ならびに設計開発期間の短縮を達成することができる。

## 4　ソフトウェア設計ツールによる設計の効率化

### 4. 1　制御装置設計における課題

パワーエレクトロニクス装置の制御装置は，この十数年で特殊なものを除いて大半がデジタル方式に置き換えられた。これに伴い，制御ソフトウェアに対する，品質要求や製作納期短縮要求も厳しくなった。通常，制御ソフトウェアの設計工程ではドキュメントが作成され，それに基づき C 言語などのプログラミング言語を用いてプログラムが製作される。そして製作されたプログラムの試験を実施して，

不具合内容についてはドキュメントやC言語のプログラムを修正し，最終的にソフトウェアを完成させる（**図6**上）。

ところが，これらドキュメントと製作されたプログラム（ソースコード）は，同じプログラム論理を二重に記述しているという側面を持つ。重複作業の排除により合理化を図りたいところであるが，ドキュメントは，品質確保のためのレビューや保守のために欠かすことはできないので，これらの重複作業は製作納期短縮要求に対するネックとなる。また，ドキュメントで記述されたプログラム論理をソースコードに移し変える作業はプログラマーの作業であるから，ここに人的ミスが含まれた場合には，たとえドキュメントでのレビューで不具合を排除したとしても，製作されたプログラムにはミスが含まれることとなり，品質低下要因の排除が十分ではない。

これらの課題を克服するために，図形式のプログラムからC言語などの実行可能なプログラムを自動生成する設計支援ツールが一部実用化されてきた。このようなコード生成ツールでは，必要なドキュメントから，自動的にソースコードを生成することにより，製作納期短縮や人為的ミスの排除が期待されている（**図6**下）。

パワーエレクトロニクス装置の制御装置分野においてもこのような支援ツールの適用が期待されるが，パワーエレクトロニクス装置の制御対象は電気系が主であり，その時定数は通常μs領域であって非常に高速なため，制御プログラムもこのような時間領域で動作可能なものでなければならない。しかし，一般的なコード生成ツールの場合，パソコンやワークステーション上で動作する大規模プログラムを想定したものが多いため，少ないリソースに実装でき，高速動作が要求されるパワーエレクトロニクス装置向けソフトウェアにおいて十分実用的といえるコードが生成できるものはほとんどないのが実情である。このような課題が残るため，実用レベルのパワーエレクトロニクス装置の制御プログラム設計においては，ドキュメントに基づき，プログラムをハンドコーディングするという古典的な手法が用いられることが多い。

図6　自動コード生成による製作納期の短縮

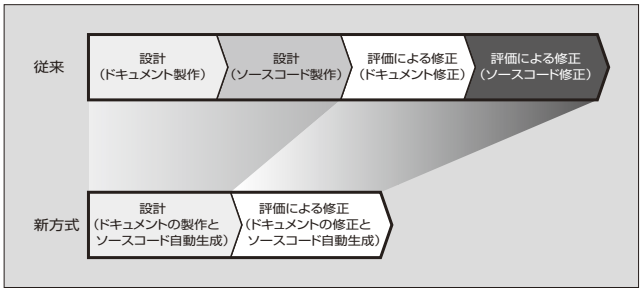
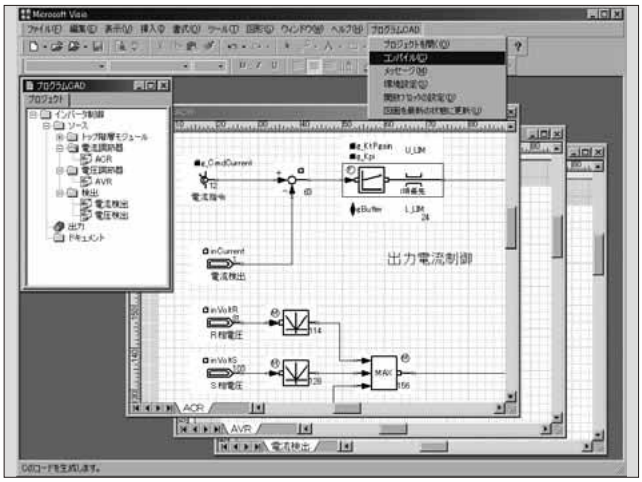



図7　ソフトウェア設計支援ツールの画面例




### 4.2　ソフトウェア設計支援ツールの構成

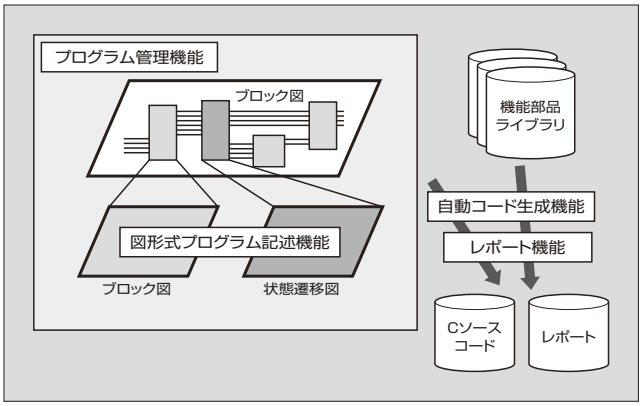
前述のとおり，汎用ツールでは性能が十分に得られなかったため，富士電機では，ソフトウェア設計支援ツールを自社開発することとした。開発した設計支援ツールの画面を**図7**に示すが，ユーザーインタフェースには汎用作図ソフトウェアであるVisio〈注〉を使用し，開発したツールはそのアドオンの形式である。本ツールの主要機能は，以下の四つであり，**図8**のように構成される。

(1)　図形式プログラム記述機能
(2)　自動コード生成機能
(3)　プログラム管理機能
(4)　レポート機能

本ツールの図形式プログラム記述機能は，ブロック図と状態遷移図でのプログラム記述をサポートしている。これらの図形式を選択したのは，パワーエレクトロニクス装置の制御が自動制御（フィードバック制御）とシーケンス制御を中心に構成され，特に自動制御においては一次元信号処理が中心であり，ブロック図での記述が適切であると判断したためである。また，シーケンス制御は，AND/ORやラッチ回路の論理ブロックによるブロック図と，状態遷移図記述の双方をサポートしており，プログラムの規模などに応じて使い分けることができる。これらの図形式で記述されたプログラムは，自動コード生成機能によってC言語のプログラムに変換される。その後はターゲットのマイクロプロセッサに対応したCコンパイラを用いてROM

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

図8　ソフトウェア設計支援ツールの構成



に書き込むダウンロードモジュールに変換される。本ツールは，中間言語としてC言語を用いているため，Cコンパイラさえ用意されていれば，ターゲットがどのようなマイクロプロセッサであっても利用可能である。

さらに，本ツールはプログラム管理機能も備えており，図形式のプログラムを機能単位で図面として管理できるようになっている。この機能は，ツリー表示によりプログラムの構造やインタフェースを見やすくしており，構造化プログラミング[3]の考え方を自然な形で取り入れることにより，設計者の思考を支援することができる。

また，自動コード生成の際にはプログラム内に記述された変数などのさまざまな情報が集約されるので，これらの情報を利用して設計時や装置試験時に必要となる情報を，表形式などの可読性の高い形式にして出力するレポート機能も実現している。これらの支援機能を備えることで，より効率的に設計などの作業を進めることができるようになっている。

### 4.3　ツールの適用効果

開発した設計支援ツールは，順次製品設計へ適用しており，コード生成の自動化やレビューの効率的な運用などにより，ソフトウェア設計の納期短縮，品質向上に効果をあげている。それ以外にも，これまで富士電機が開発してきたパワーエレクトロニクス製品の制御のノウハウを設計者間で容易に共有し，設計の標準化を効率的に推進する効果や，データの蓄積により，容易にソフトウェアの再利用を可能とする技術の継承などにも効果をあげている。また，図形式プログラム上で実機をモニタリングするモニタリングツールなどの周辺ツールも併せて開発・実用化しており，設計から検証・調整までをカバーし，多くのパワーエレクトロニクス製品に応用できる，制御ソフトウェア設計の総合的プラットフォームとしての役割を担っている。

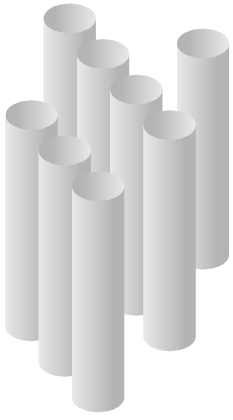
## 5　あとがき

本稿では，高信頼性かつ高品質なパワーエレクトロニクス装置の実現を目的に自社開発した，専用設計ツールについて紹介した。

今後は，より効率的・効果的となる設計開発の方法論を構築し，一層信頼性の高いパワーエレクトロニクス製品の迅速な提供に貢献していく所存である。

### 参考文献

(1)　滝沢聡毅ほか．大容量6in1 IGBT モジュールの適用技術．富士時報．vol.75, no.8, 2002, p.449–452.
(2)　滝沢聡毅ほか．パワーエレクトロニクス主回路構造の解析技術．富士時報．vol.77, no.2, 2004, p.162–165.
(3)　SESSAME WG2（編）．組込みソフトウェア開発のための構造化モデリング．翔泳社．2006.



# 鉄道車両・産業向けインバータの高性能化技術

特集

阿部　康（あべ　やすし）　田畑　壮章（たばた　まさふみ）　松原　邦夫（まつばら　くにお）

## 1　まえがき

近年，スイッチング素子である IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）の高耐圧化が進み，サイリスタと同様な定格電圧を持つ高耐圧 IGBT が製品化されている。IGBT は電圧駆動型であるため，サイリスタと比較すると，駆動電力が非常に小さい，安全動作領域が広くスナバレスやアノードリアクトルレスが可能など，幾つかの利点を有し，装置のより一層の小型化・低コスト化が可能である。このような理由から，IGBT が鉄道車両や産業用向けのインバータへ盛んに適用されている。

しかし，IGBT は素子耐圧の増加につれて，オンオフ時に発生するスイッチング損失が飛躍的に増える傾向にある。損失の増加に伴い，素子温度も上昇し，3.3 kV 定格を超える高耐圧素子の実用的なキャリヤ周波数は，1 kHz 未満に制限される。キャリヤ周波数が低減されることによってインバータの出力波形に多くの高調波が含まれ，これらがフィルタの大型化と，トランスやインダクタなどの磁気部品から発生する騒音の原因となる。

このような背景のもと，富士電機では高耐圧を確保し，かつ大幅にスイッチング損失を低減できる IGBT の適用技術として，1 kV 級の定格電圧を持つ汎用 IGBT を直列接続する技術，およびその適用技術の開発を行っている。汎用 IGBT は高耐圧 IGBT と比較すると，スイッチング損失が非常に小さく，10 kHz を超えるキャリヤ周波数で動作させることが可能である。このような素子を多直列接続し，さらにこれらのスイッチングを同期させ，1 スイッチとして動作させることで，高耐圧化と低損失化を両立できる。

本稿では，IGBT の直列接続技術と，これを応用したインバータの事例について紹介する。

## 2　IGBT 直列接続技術

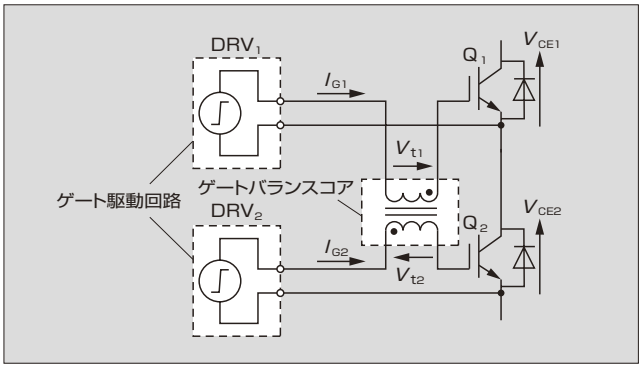
スイッチングデバイスを直列に接続した場合，最も重要な課題の一つは，各スイッチングデバイスに印加される素子電圧を平衡化することである。特に，ターンオフの過渡動作時には，主回路配線インダクタンス，およびコレクタ電流の変化率（$di/dt$）に起因するサージ電圧が発生するため，素子電圧が不平衡になると，特定の素子にコレクター－エミッタ間電圧の絶対定格を超える電圧が印加されて，素子破壊を招く可能性が大きい。

富士電機では，非常にシンプルな回路構成でありながら，直列接続された IGBT の素子電圧を，過渡動作期間においても平衡化できる回路方式を開発した。

**図 1** に，本回路方式を適用した IGBT の 2 直列接続回路を示す。この図において，各素子のゲート配線に接続しているゲートバランスコアが素子電圧平衡用の回路であり，1 対 1 の巻線比をもつ 2 巻線トランスの一種である。この図のように，各ゲート配線を磁気的に結合させる回路構成としている。

**図 2** に示すターンオフ波形を用いて，ゲートバランスコアの回路動作原理を説明する。ここでは，$Q_1$ のゲート駆動回路 $DRV_1$ から出力されるゲート信号が，$Q_2$ のゲート駆動回路 $DRV_2$ から出力されるゲート信号に比べて，タイミングが $\Delta t_{off}$ の時間だけ早いと仮定する。ゲートバランスコアが接続されていない場合，ターンオフ動作が開始された直後，$\Delta t_{off}$ の時間差により**図 2** の破線で示すように，$V_{CE1}$ が先に上昇し始める。$\Delta t_{off}$ 後，$DRV_2$ からゲートオフ信号が出力されるため，$V_{CE2}$ も上昇し始めるが，両素子電圧には不平衡が生じてしまう。これに対し，ゲートバ

図 1　直列接続回路の構成



**阿部　康**

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

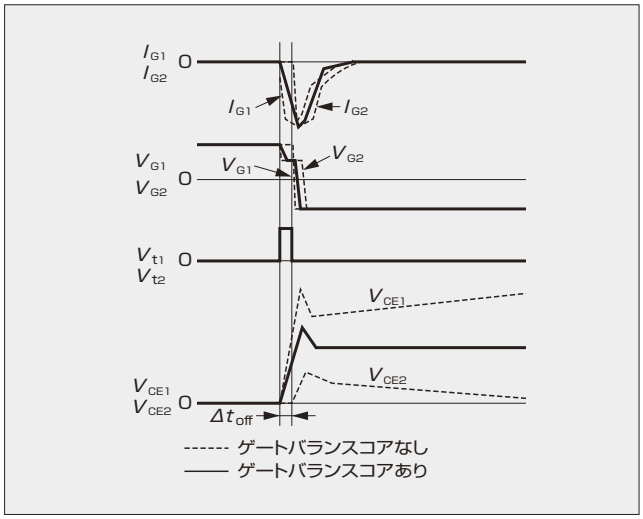
**田畑　壮章**

電力変換装置，パワーデバイスの研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員。

**松原　邦夫**

電力変換装置，パワーデバイスの研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員。

図 2　ターンオフ時の各部波形




ランスコアを接続した場合，トランスの動作原理によってゲート電流 $I_{G1}$，$I_{G2}$ が同波形になるようにゲートバランスコアが動作する。その結果，各ゲート電圧が同時にしきい値電圧に達するように制御されるため，**図 2** の実線で示すように，両素子のゲート波形は同波形となる。以上の原理により，各素子がターンオフするタイミングが同期し，素子電圧の平衡化が実現される。

## 3　応用装置

汎用 IGBT モジュールの多直列接続方式を適用したインバータの事例について，紹介する。

### 3.1　直流電車用補助電源装置

(1)　主変換回路構成

**図 3** に主回路構成，**表 1** にこの回路の定格仕様を示す。この回路は，直流 1,500 V 架線に対応しており，一般的な 2 レベルインバータの構成としている。インバータの出力には，高調波を低減するためのコンデンサとリアクトルで構成されるフィルタが接続され，トランスを通して負荷へ電力を供給している。IGBT には，1.2 kV 耐圧の汎用 IGBT モジュールを適用し，1 スイッチあたり 3 直列接続することによって，3.6 kV の耐圧を確保している。このような素子構成とすることにより，3.3 kV 定格の高圧 IGBT を適用した従来機種と比較すると，スイッチング損失が大幅に低減され，キャリヤ周波数を従来の約 4 倍となる 4.98 kHz にすることを可能としている。キャリヤ周波数の高周波化により，フィルタの小型化と低騒音化を実現している。

また，**図 4** にゲート駆動回路の外観を示す。このゲート駆動回路は，3 直列接続された IGBT に，同じオンオフ信号を出力できるものである。**図 4** に示す $GBC_1$ と $GBC_2$ は，ゲートバランスコアである。これらを，3 素子分のゲート配線がすべて磁気結合されるように接続することで，素子電圧の平衡化を行えるようにしている。また，各素子の電位は，三つのトランスによって絶縁されており，一つのトランスは対地とゲート駆動回路間，また残りの二つは素子間を絶縁するような回路構成としている。この構成により，素子間の絶縁トランスは小型のものが適用でき，その結果，ゲート駆動回路全体の小型化を実現している。

(2)　低騒音化

キャリヤ周波数を増加させることによる低騒音化の効果を確認するために，**図 3** の主変換回路を定格運転し，フィルタから発生する騒音を測定した。また，従来機種と同様のキャリヤ周波数である 1.26 kHz での条件においても騒

図 3　電車用補助電源の主回路構成

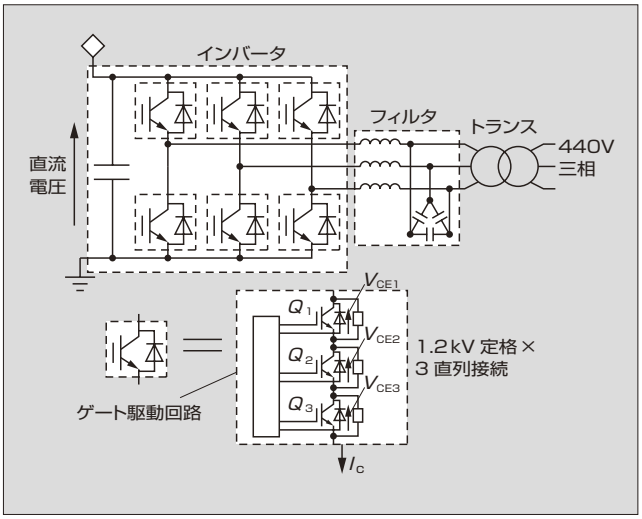
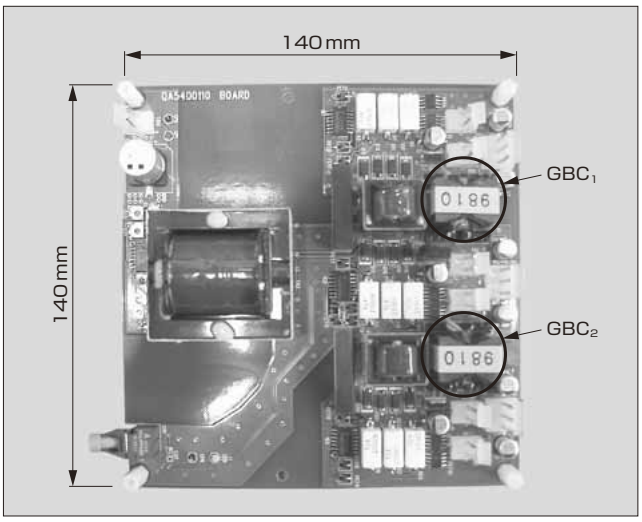



表 1　電車用補助電源の主回路の定格仕様

| | |
|---|---|
| 直　流　電　圧 | 1,500 V |
| 出　力　容　量 | 150 kVA |
| 出　力　電　圧 | 440 V，三相 |
| IGBT | 1.2 kV耐圧 |
| 素 子 直 列 数 | 3直列接続 |
| キャリヤ周波数 | 4.98 kHz |

図 4　ゲート駆動回路の外観



音を測定し，4.98 kHz の結果と比較した。その結果，キャリヤ周波数が 1.26 kHz の場合，耳障りとなる 2 kHz や 4 kHz 付近の騒音の周波数成分が発生するが，キャリヤ周波数が 4.98 kHz の場合には，周波数成分が 8 kHz を超える帯域に移動する傾向が得られた。これにより，騒音レベルを A レンジの実測値で約 4 dB 低減できることを確認した。

図 5　キャリヤ周波数 1.26 kHz での負荷急変時における出力波形

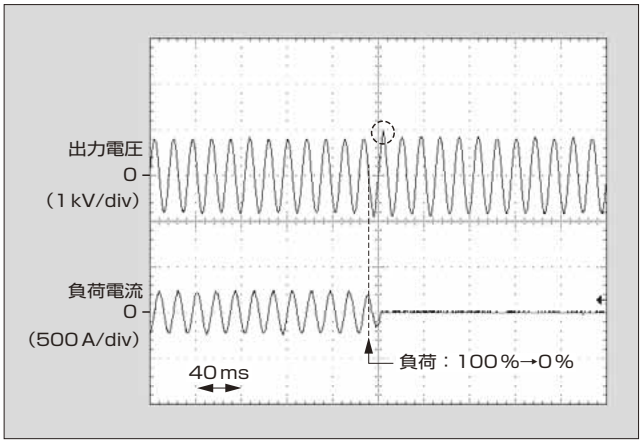
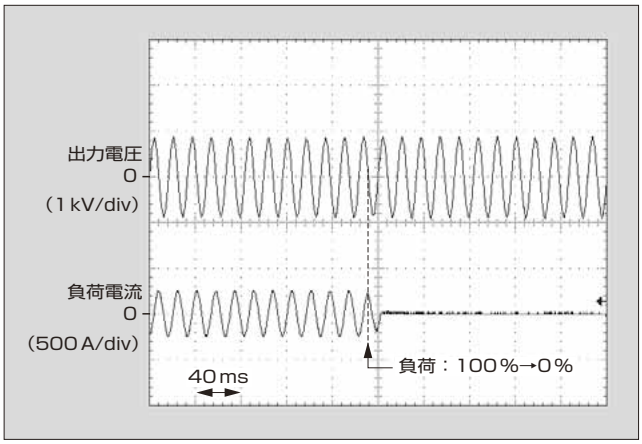



図 6　キャリヤ周波数 4.98 kHz での負荷急変時における出力波形




(3)　出力電圧制御応答

一定の電圧・周波数の交流電力を出力する補助電源装置では，負荷として接続されるエアコンディショナなどの投入・遮断に伴う負荷急変が発生した場合でも，波形のひずみや電圧不平衡が少ない安定した電圧を出力することが求められる。ここでは，負荷急変を模擬的に発生させ，キャリヤ周波数の高周波化による制御応答への効果を検証した結果について述べる。騒音の測定時と同様，キャリヤ周波数を 1.26 kHz と 4.98 kHz に設定し，フィルタのリアクトルもこれらに応じて変更した。負荷急変は定格負荷運転中に負荷線を切り離して無負荷へ切り替えて行った。**図 5**，**図 6** はそれぞれ，キャリヤ周波数 1.26 kHz，4.98 kHz のときの出力電圧・電流波形である。キャリヤ周波数が 1.26 kHz では，負荷急変が発生すると出力電圧に 10％程度の過渡的な電圧上昇が発生する（**図 5** の破線の丸印内）。これに対して，キャリヤ周波数を 4.98 kHz とすると，負荷急変した場合においても，出力電圧が変動することなく，良好な過渡応答特性が得られている。これは，キャリヤ周波数の増加に伴い，制御のサンプリング数が増加したことと，フィルタリアクトルのインダクタンス値が小さくなり，負荷急変時にフィルタコンデンサに流れ込むエネルギーが減少したためである。以上の評価結果から，キャリヤ周波数を高周波化することで，負荷急変時の出力安定度を改善できることが実証できた。

### 3. 2　3.3 kV 入出力インバータ

ここでは，汎用 IGBT の直列接続技術を適用した，3.3 kV 定格の系統および高圧モータに直接接続できるインバータについて紹介する。

**図 7**，**図 8** にそれぞれ，主回路構成，整流部の入力電圧波形を示す。この回路は，入出力が 3.3 kV 電圧に対応した，

図 7　3.3 kV 入出力インバータの主回路構成

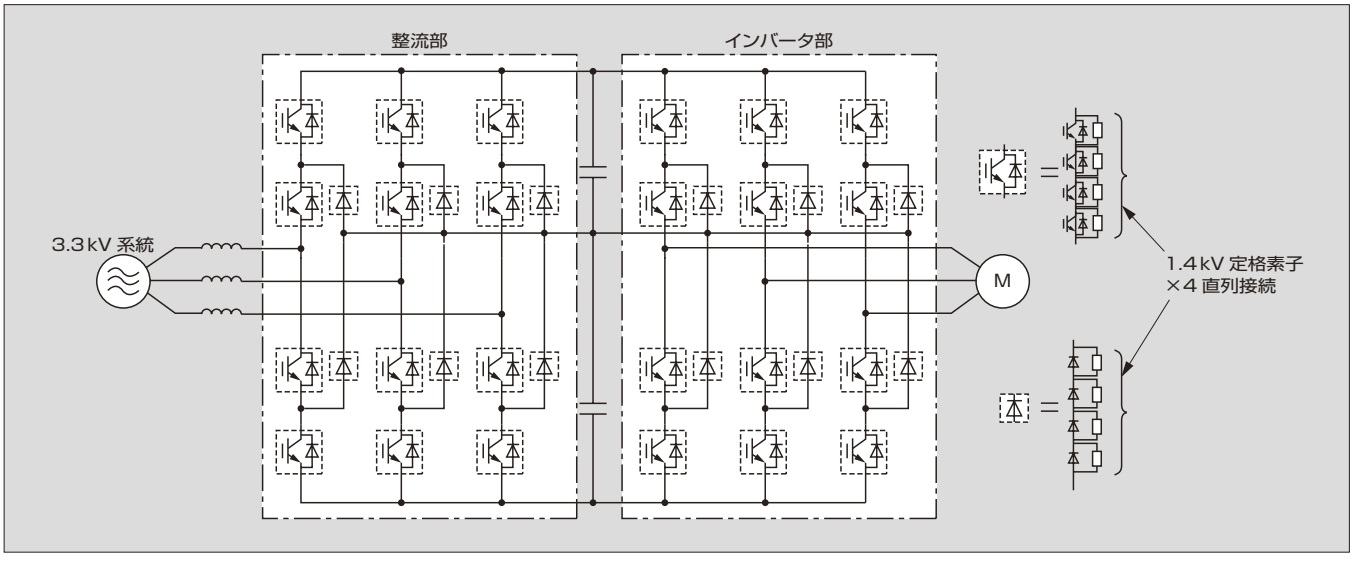


図 8　整流部入力電圧波形

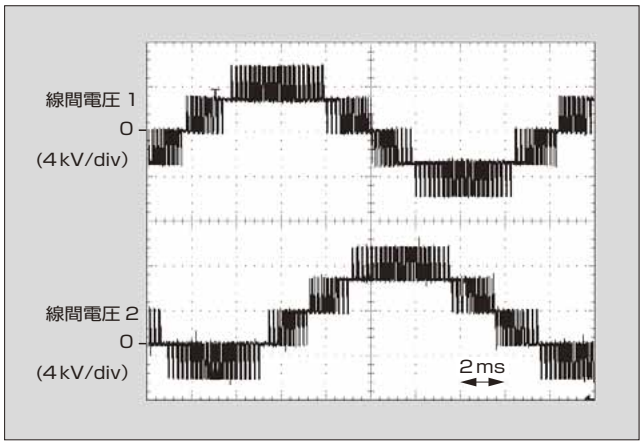



図 9　最大電圧・最大電流での遮断波形

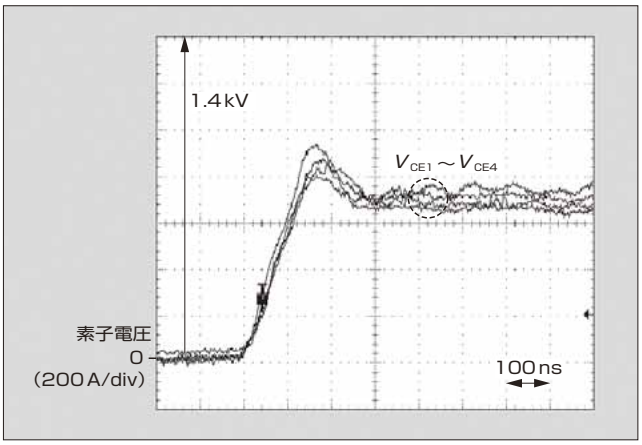



表 2　3.3 kV入出力インバータの主回路の定格仕様

| | |
|---|---|
| 直 流 電 圧 | 5,400 V |
| 出　　力 | 3.3 kVrms，825 kVA |
| IGBT | 1.4 kV |
| 素 子 直 列 数 | 4直列接続 |
| キャリヤ周波数 | 4.8 kHz |

整流部とインバータ部の組合せで構成されている。また回路方式には，ダイオードクランプ形の 3 レベル回路方式を適用している。ここに適用されている IGBT とダイオードは，**図 7** に示すように 1.4 kV 定格素子を 4 直列接続して構成しており，等価的な素子耐圧は 5.6 kV となる。この回路の定格仕様は，**表 2** のとおりである。スイッチング損失が小さいことで，キャリヤ周波数は 4.8 kHz と非常に高い周波数に設定することを可能としている。

**図 9** に，直流電圧と素子電流がそれぞれ最大電圧と最大電流の場合における 1 スイッチ分の素子遮断波形を示す。これは，4 直列接続された IGBT の各コレクタ－エミッタ間電圧を測定した波形である。これらの波形から，素子ターンオフ時における過渡電圧バランスは良好に保たれており，ゲートバランスコアが効果的に動作していることが分かる。さらに本回路には，主配線のインダクタンスを抑制したバスバー構造を採用することにより，素子のピーク電圧を，コレクタ－エミッタ間電圧の最大定格に対して約 65 % に抑制できており，より信頼性を高めた回路を実現できた。

## 4　あとがき

鉄道車両や産業向けのインバータに関して，富士電機の IGBT 直列接続技術を適用した事例について紹介した。今後，顧客のニーズを先取りした製品開発が行えるよう，パワーエレクトロニクス分野の技術開発を積極的に推進していく所存である。

### 参考文献

(1)　Abe, Y. et al. A Novel Method for Loss Reduction in High-Voltage Inverters. IEEE Industry Applications Conference 40th IAS Annual Meeting. 2005, p.1849-1854.
(2)　阿部康ほか．IGBT 直列接続適用 3.3 kV トランスレス 3 レベルインバータ．平成 18 年電気学会産業応用部門大会．2006, p.521.

# 産業プラントを支える可変速駆動システム

特集

安藤　俊明（あんどう　としあき）　　木谷　剛士（きだに　つよし）

## 1　まえがき

鉄鋼・製紙・石油化学などの産業プラントは電動機が最も多く使われる分野であり，電動機駆動制御がそのプラントの能力を決める最も大きな要因の一つである。

電動機の可変速駆動システムとして，古くは直流電動機と発電機の組合せ（M-G）や直流電動機とサイリスタを適用した直流電源との組合せ（定電圧電源，サイリスタレオナード）が適用されたが，インバータの登場により交流電動機とインバータの組合せへ移行した。交流電動機は直流電動機と比べ保守が容易であることに加え，パワーエレクトロニクス技術の発展によりインバータの高機能化と低価格化が進んだことにより急速に普及した。

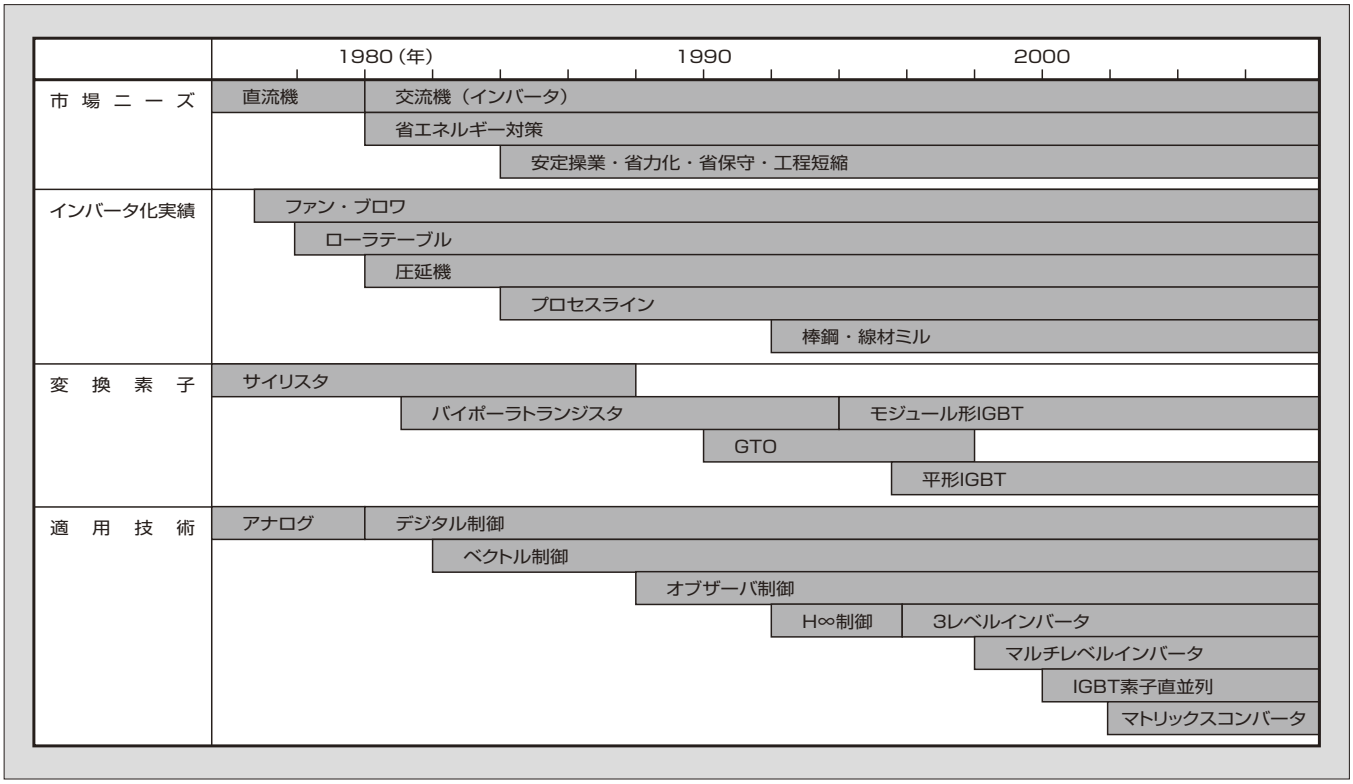
また，可変速駆動システムにはファン・ポンプや単体機器に単独で用いられる汎用インバータと，製鉄や製紙といった産業プラントにおいて多数の組合せで用いられるプラント用可変速駆動システムがある。

本稿では，可変速駆動システムの推移と富士電機の産業プラント用可変速駆動システムの代表機種について紹介する。

## 2　可変速駆動システムの推移

可変速駆動システムは製造プロセスの高速化，製品の高品質化，安定操業の要求から高度な速度制御精度，トルク制御精度，応答性が要求され，コストパフォーマンスの向

図1　可変速駆動システム技術の推移



**安藤　俊明**

電動力応用プラントのエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業プラント本部第一統括部ドライブシステム技術部主任。

**木谷　剛士**

産業用インバータの開発設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部パワエレ開発センター開発設計部。

上を追求しながらさまざまな駆動制御方式が開発されてきた。また，設備の大規模化・複雑化に伴い省力化・省保守化が進められてきた。近年，地球環境の改善のために省エネルギー化が進められている。

変換素子は，サイリスタ，バイポーラトランジスタからGTO（Gate Turn-Off thyristor），IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）へと進化し，高耐圧化，大電流化，制御精度の向上を支えてきた。

IGBTの適用においては，素子単体の高耐圧化と大電流化，素子直列とインバータセルの直列化による高耐圧化，電動機の多巻線化とインバータセルの並列化による大容量化，変換器のマルチレベル化が行われている。

富士電機では圧延主機をはじめ，棒鋼・線材ミル，プロセスライン，抄紙機，フィルムラインなど各種プラントでの交流可変速化を進めてきた。

可変速駆動システム技術の推移を**図1**に示す。

## 3　富士電機の可変速駆動装置のラインアップ

産業プラントに適用される可変速駆動装置は，それぞれのプラントにより出力容量が数kVAから十数MVAまで多岐にわたっており，制御方法，揃速（せんそく）性，速度やトルクの制御精度などの要求もさまざまである。

富士電機では，10kVAから最大5,400kVAまでには400V級2レベルIGBTインバータを，1,200kVAから16,000kVAまでには800V級3レベルIGBTインバータを，それ以上は3.3kV級3レベルインバータを適用している。また，ファン・ポンプ用としては，7,500kVAまで3/6kV級マルチレベルIGBTインバータを適用している。**図2**に富士電機の交流可変速駆動装置の適用マップを示す。

富士電機では，可変速駆動装置として**表1**に示す製品をラインアップしている。代表的な適用例を以下に示す。

コイル状の鋼板を巻き戻し，酸洗，焼鈍，めっきなどの表面処理を連続的に行い，再びコイル状に巻き取るプロセスラインは数kWのヘルパから数百kWのリール，ブライドル，ミルなどで構成されており，各ロールが鋼板でつながっていることから揃速性が重要である。また，鋼板を引っ張るロールと鋼板に引っ張られるロールがあり，エネルギーを授受できるため，コンバータを共通として容量を小さくできる直流配電形インバータが適しており，ベクトル制御400V級2レベルIGBTインバータ「FRENIC4000VM5」を適用している。

可逆圧延ミル用としては，ベクトル制御3.3kV級3レベルインバータ「SIMOVERT ML2」を，棒鋼・線材ミル主機用としてはベクトル制御800V級3レベルIGBTインバータ「FRENIC4400VM5」を，補機用としてはベクトル制御400V級2レベルIGBTインバータ「FRENIC4000VM5」を適用している。

3/6kVのファン・ポンプ駆動用としては3/6kV級マルチレベルIGBTインバータ「FRENIC4600FM5」を適用している。

このほか，汎用インバータとして2レベルインバータ「FRENIC5000シリーズ」も各種ラインアップしている。

図2　交流可変速駆動装置の適用マップ

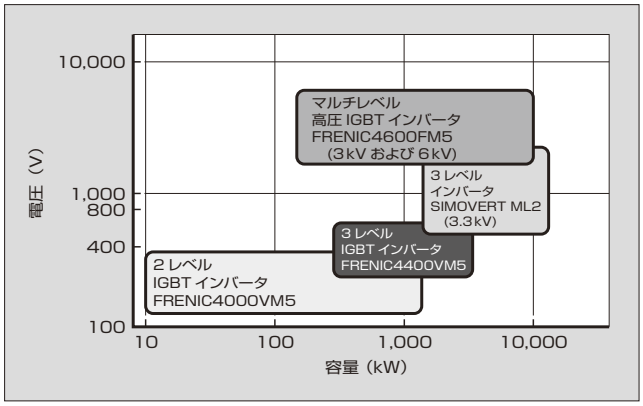



表1　可変速駆動装置の製品群

| 製品名 | 制御方式 | 容　量 | 主な用途 |
|---|---|---|---|
| SIMOVERT ML2 | 大容量PWMインバータ<br>3レベル　3.3kV | 10,000kVA<br>28,000kVA（3多重） | ミル主機ドライブ |
| FRENIC4000VM5<br>FRENIC4000FM5 | 直流配電PWMインバータ<br>IGBT　2レベル　400V | 10，15，25，38，50，75，100，150，225，300，<br>450，600，900～5,400（kVA）（6多重） | ミル補機ドライブ<br>棒線ミル<br>プロセスライン<br>抄紙機<br>押出機<br>セメントミル<br>ファン，ポンプ |
| FRENIC4400VM5 | 直流配電式インバータ<br>IGBT　3レベル　800V | 1,200，2,000，7,200，16,000（kVA）（8多重） | |
| FRENIC5000G11S<br>FRENIC5000VG7 | 個別給電PWMインバータ<br>IGBT　2レベル　200/400V | ～110kW（200V）<br>～710kW（400V） | |
| LEONIC-M600<br>LEONIC-M Compact | 直流ドライブ | ～数千kW<br>27.5～150kW | |
| FRENIC4600FM5 | 高圧IGBTインバータ<br>マルチレベル　3.3kV，6.6kV | ～3,750kVA（3.3kV）<br>～7,500kVA（6.6kV） | 省エネルギー<br>ブロワ<br>ポンプ<br>コンプレッサ<br>冷凍機 |
| FRENIC5000P11S | 個別給電PWMインバータ<br>IGBT　2レベル　200/400V | ～110kW（200V）<br>～710kW（400V） | |
| FESPAC<br>FRENIC5000VG7 | PMモータ（高速モータ） | ～300kW | |

特集

## 4　2レベルインバータ「FRENIC4000VM5/FM5」

2レベルIGBTインバータ「FRENIC4000シリーズ」は，AC400V級出力の直流配電方式インバータであり，制御方式によりベクトル制御，センサレスベクトル制御のVM5，V/f制御のFM5から成る。制御方式によらず主回路および制御装置，ソフトウェアは同一で，容易に切換が可能である。

盤写真を**図3**，標準仕様を**表2**，単線結線図例を**図4**に示す。

FRENIC4000シリーズは300kVA以下をプラグインタイプのユニット構造，450kVA以上を盤構造としており，次の特徴がある。

(1)　省スペース，自由なユニット配置

幅800mmの盤1面に最大12ユニット（25kVA以下時）を収納可能で，大幅な省スペース化を実現できる。ユニットの盤への収納は，10～300kVAの容量の違い，VM5/FM5機種の違いにかかわらず混在可能，挿入位置は任意に指定可能なので，要求に合わせた自由度の高いユニット配置が可能である。また，幅800mm盤1面での最大容量は900kVA/AC400Vで定格電流1,299Aまでの電動機が駆動可能である。盤の外形を**図5**に示す。

(2)　プラント制御に最適

上位との制御伝送はフィールドバスとして世界的に普及しているPROFIBUS-DP伝送に加え，富士電機オリジナルのDライン，Tリンク，SXバスに対応している[(1)]。

また，制御機能として，ドループ制御，各種トルク制御，トルク制限機能，インパクトドロップ補償オブザーバ，軸ねじれ抑制オブザーバ，加減速フォーシング補償，バックラッシュ補償，電動機ロック機能，速度拾い込み運転，保護レベルの4分化などプラント制御に有用な制御機能を標

図3　FRENIC4000VM5/FM5

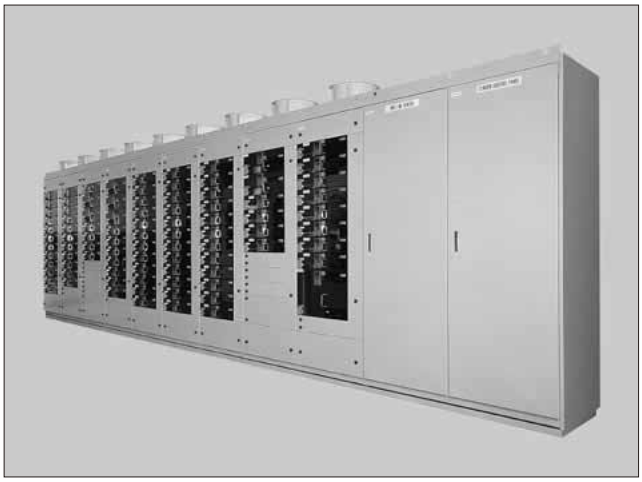


図4　単線結線図の例

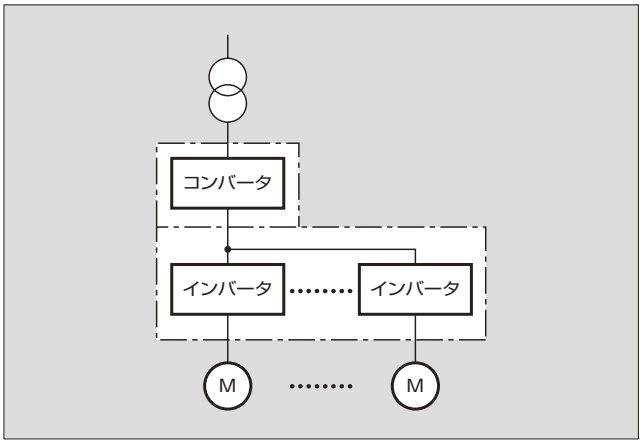
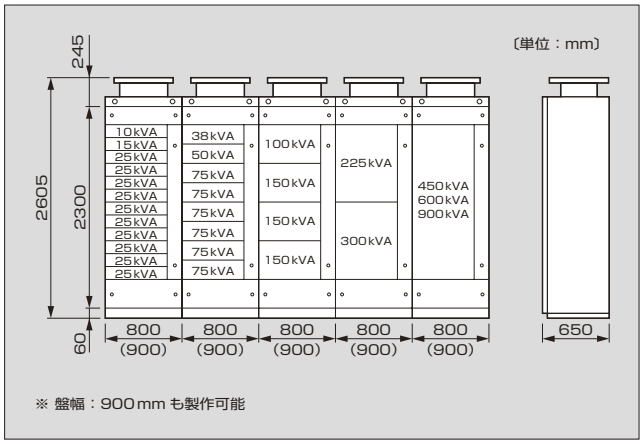



表2　プラント用可変速駆動装置の標準仕様

| 項目＼形式 | | FRENIC4000VM5 | FRENIC4000VMT5 | FRENIC4000FM5 | FRENIC4400VM5 | FRENIC4400FM5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 入力電圧 | | DC600V | | | DC1,200V | |
| 出力 | 電圧 | 三相　AC400V | | | 三相　AC800V | |
| | 周波数 | 200Hz（最大） | | | 120Hz（最大） | |
| 容量系列 | | 10，15，25，38，50，75，100，150，225，300，450，600，900（kVA） | | | 1,200，2,000（kVA） | |
| インバータ多重化 | | 二重化　1,200，1,800（kVA）（最大六重化5,400kVA） | | | 二重化　2,400kVA（最大八重化　9,600kVA） | |
| 定格 | | 100%連続，過負荷耐量150%1分間 | | | 100%連続，過負荷耐量150%1分間 | |
| 運転モード | | 4象限 | | | 4象限 | |
| 上位伝送 | | Dライン，Tリンク，PROFIBUS-DP，SXバス | | | Dライン，Tリンク，PROFIBUS，SXバス | |
| 制御 | 方式 | ベクトル制御+正弦波PWM速度制御 | ベクトル制御+正弦波PWM速度制御+高精度トルク制御 | 正弦波PWM V/f一定制御 | ベクトル制御+正弦波PWM速度制御 | 正弦波PWM V/f一定制御 |
| | 範囲 | 1：1,000 | 1：1,000 | 1：80 | 1：1,000 | 1：80 |
| | 界磁範囲 | 1：4 | 1：4 | 1：4 | 1：4 | 1：4 |
| | 精度 | 速度±0.01% | 速度±0.01%<br>トルク±3% | デジタル設定時<br>周波数±0.01% | 速度±0.01% | 周波数±0.01% |

図 5　FRENIC4000VM5/FM5 盤外形




準機能としてインバータに搭載している。

なお，各容量共通で瞬時電圧低下 100 %，500 ms の耐量があり，復電時に自動再起動が可能である。

(3)　メンテナンス性の向上

300 kVA 以下のユニットタイプは制御回路，主回路も含めて完全プラグイン構造で主電源投入状態でのユニット交換作業が可能である。450 kVA 以上についてもすべて盤前面のみでの保守が可能である。

また，インバータ出力ブレーカをユニットに内蔵可能（50 kVA 以下），出力コンタクタを内蔵可能（150 kVA 以下）で，手動または電動でインバータ－電動機間を断路可能である。

さらにユニット個別の冷却ファンをなくし，盤天井ファンのみとすることで保守費用の削減を図っている。

(4)　容量系列の拡大

従来機種の容量系列は 10 ～ 450 kVA であったが，VM5 シリーズでは 450 kVA と同一設置サイズで 600 kVA，900 kVA をラインアップに追加し，従来比最大 50 % 減の小型化を図った。

また，VM5 シリーズはインバータ複数台で 1 台の多巻線電動機を駆動する多重駆動が可能である。多重駆動時に従来必要であった出力 AC リアクトルは不要で，最大 6 多重 5,400 kVA まで大容量化が可能である。

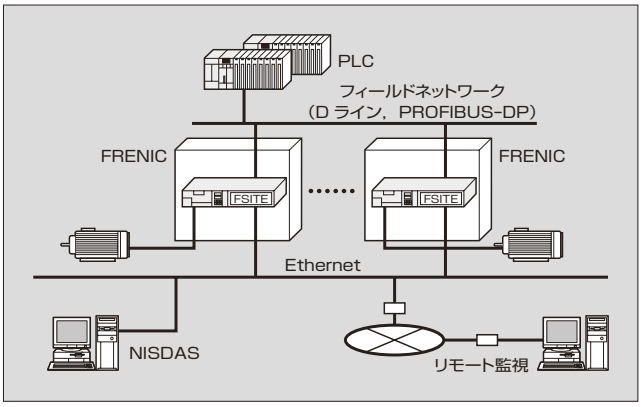
(5)　豊富なメンテナンスツール

パソコンローダ（FLOAD for Windows〈注 1〉）は，日常の制御パラメータの管理，運転状態の管理が可能で，故障発生時にはトレースバック機能〈注 2〉により故障時のインバータの各部の波形・状況が分かるので，原因究明・早急復旧に役立つ。

Web アダプタ（plusFSITE[2]）は，インバータ間を Ethernet〈注 3〉で接続し，パソコンのブラウザからインバータの監視が可能である。また，故障発生時にはトレースバックデータを添付したメールが発信できる。

高速集中監視システム（NISDAS[3][4]）は，インバータ装置を高速で集中監視することができ，併せて富士電機の汎用プログラマブルコントローラ（PLC）「MICREX-SX」の内部データも収集可能である。システム構成例を**図 6** に示す。

図 6　監視システムの構成例




## 5　「FRENIC4000 シリーズ」のコンバータ

FRENIC4000 シリーズは出力電圧 DC600 V 系のコンバータ 1 台に対し，インバータ複数台を接続する直流配電方式を採用している。この方式は電動機間の駆動/回生エネルギーが直流母線を介して授受されるためプラントの高効率運転が可能である。

コンバータの回路方式は，低高調波・力率 1 制御には PWM コンバータ，大電流駆動/回生を省スペースで実現するサイリスタコンバータ，大電流が可能なダイオードコンバータ，回生量が駆動に比べて少ない場合にダイオードコンバータと合わせて使用する回生コンバータ，発電制動ユニットなどがあり，目的・用途に合わせて選択可能である。

## 6　3 レベルインバータ「FRENIC4400VM5/FM5」

3 レベル IGBT インバータ「FRENIC4400 シリーズ」は，FRENIC4000 シリーズと同じく直流配電方式のインバータであるが，出力が AC800 V，出力波形が 3 レベルという点が 2 レベルインバータとの違いである。3 レベルの PWM パルスパターンは専用のゲートアレイで実現している。

3 レベルインバータは出力高調波，トルク脈動の低減ができるとともに，電動機巻線へのサージ電圧を低減できるため，電動機や機械側へ与える影響を低減できる。3 レベルインバータの出力波形例を**図 7** に示す。

〈注 1〉Windows：米国 Microsoft Corp. の米国およびその他の国における登録商標

〈注 2〉トレースバック機能：故障発生前後のインバータ各部の波形，ビットの動きをインバータ本体に記録しておき，後にパソコンローダ，Web アダプタなどから参照可能な機能

〈注 3〉Ethernet：米国 Xerox Corp. の登録商標

特集

単機容量は1,200 kVA，2,000 kVA であるが，ベクトル制御の VM5 では 2 レベル同様多重化が可能で，8 多重 16,000 kVA まで大容量化が可能である。

## 7　大容量インバータ「SIMOVERT ML2」

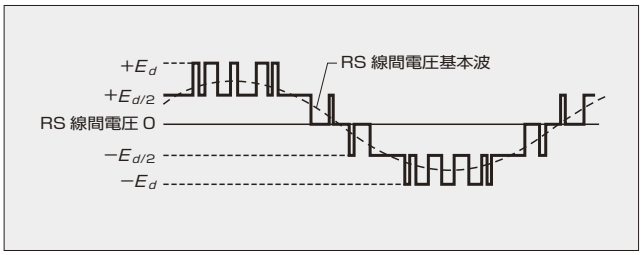
鉄鋼・非鉄設備の大型圧延主機駆動用として，10 MVA 3.3 kV 3 レベルインバータを適用している。これはドイツのシーメンス社が製作し，日本国内で富士電機が販売するものである。

このインバータの特長は，電源力率≒ 1，高調波電圧ひずみ率小，同期電動機の高機能トランスベクトル制御，電動機力率＝ 1，高速過渡応答である。水冷変換器を採用することにより盤設置床面積の縮小化を図っている。電動機は円筒形同期電動機を採用しており，きわめて堅牢（けんろう）な構造で圧延機のような過激な外力にも耐える最適設計，巻線はスロットに接着され，すきまなしという特徴を持つ。また，誘導電動機に比べ高効率であり，慣性モーメントが小さく，かみ止まり時も大トルクを出力可能である。

## 8　高速永久磁石電動機

永久磁石を用いた出力 100 kW 級，回転数 20,000 r/min 級の高速同期電動機を食品関連工場の機械設備用として製品化した。工場の省エネルギー化に貢献するものと期待される。

図 7　3 レベルインバータの出力波形




効率に優れコンパクト化できる永久磁石の採用により，電動機の高速化，機械へのビルトイン化を実現している。渦電流による回転子の発熱を材質，構造の改良により低減した。また，省スペース，初期投資費用削減，保守性向上のために，水冷方式も開発した。インバータは誘導電動機駆動用として多くの納入実績のある「FRENIC5000VG7 シリーズ」を適用する。

## 9　サイリスタレオナード「LEONIC シリーズ」

可変速駆動システムの主流は交流電動機＋インバータの組合せに移ったが，現在もなお数多くの直流電動機が産業プラントで使用されている。堅牢でオーバホールにより延命化を図ることができる直流電動機に対し，アナログ制御サイリスタレオナード（DSR シリーズ，LEONIC-U など）はアナログ回路構成部品の入手が困難であることからその多くは保守が困難な状況にある。

図 8　LEONIC-M Compact の外観

表 3　LEONIC-M Compactの標準仕様

| 形式RGFM7CMS-□□□□ | | 2702 | 4502 | 7502 | 5504 | 9004 | 1514 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 標準適用電動機容量 (kW) | | 27.5*1 | 45*1 | 75*1 | 55*2 | 90*2 | 150*2 |
| 電源 | 電機子主回路 | 三相AC200～240 V，50/60 Hz | | | 三相AC400～460 V，50/60 Hz | | |
| | 界磁主回路 | 単相AC200～240 V，50/60 Hz | | | | | |
| | 制御/同期電源 | 単相AC200～220 V，50/60 Hz | | | | | |
| | 許容変動 | ±10%，−3～+2 Hz | | | | | |
| 出力 | 電機子主回路出力電流（連続）(A) | 150 | 240 | 400 | 150 | 240 | 400 |
| | 電機子主回路出力電流（1分）(A) | 225 | 360 | 600 | 225 | 360 | 600 |
| | 界磁主回路出力電流（連続） (A) | 15 | 24 | 40 | 15 | 24 | 40 |
| | 電機子主回路出力電圧 (V) | 220*3 | | | 440*4 | | |
| | 界磁主回路出力電圧 (V) | 160*5 | | | | | |

＊1：主回路出力電圧がDC220 V時，＊2：主回路出力電圧がDC440 V時，＊3：入力電圧が220 Vの場合，＊4：入力電圧が440 Vの場合，
＊5：入力電圧が240 Vの場合

富士電機は主要構成部品をインバータと共通化し，小容量（DC220 V 75 kW 以下，DC440 V 150 kW 以下）に特化した「LEONIC-M Compact」を製品化している。この装置は各種制御伝送のほかにアナログ指令やタコジェネレータへも対応しており，既設ドライブ装置からの置換えを考慮している。また，FRENIC4000 シリーズと共通のメンテナンスツールが使用可能で保守作業が容易である。

LEONIC-M Compact の外観を**図 8**，標準仕様を**表 3** に示す。

なお，中大容量直流電動機には「LEONIC-M600」を適用する。

## 10　あとがき

富士電機の産業プラント用可変速駆動システムの推移と代表機種について紹介した。可変速駆動システムの発展はすなわち産業プラントの発展でもある。富士電機は今後も可変速駆動システムの提供を通じて産業プラントの発展に寄与していく所存である。

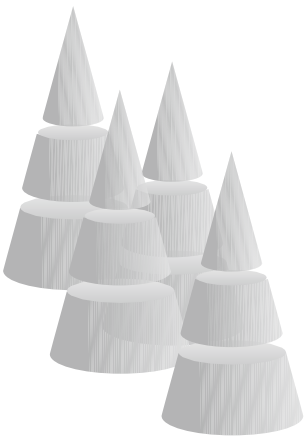
**参考文献**

(1)　西村英二ほか．ドライブ制御システムのオープン化・インテリジェント化．電気学会金属産業研究会．MID-00-40, 2000.

(2)　西村英二ほか．オープン指向のプラント用制御機器監視システム．圧延理論部会．圧理 122-11, 2005.

(3)　伊藤伸一ほか．IT の導入によるプラントシステムの保全効率向上と延命化．電気学会金属産業研究会．MID-03-21, 2003.

(4)　簗嶋賢次ほか．プラントシステム監視・解析支援パッケージの f（s）NISDAS の開発．電気学会金属産業研究会．MID-02-3, 2002.



# 環境改善・省エネルギー用高圧インバータ

特集

藤本　　潔（ふじもと　きよし）　　花澤　昌彦（はなざわ　まさひこ）

## 1　まえがき

従来，環境改善・省エネルギー目的の交流可変速駆動設備導入は，低圧電動機と低圧インバータによるシステムが先行してきたが，近年高圧電動機の可変速制御が普及してきている。これは高圧電動機を直接可変速制御できる高圧インバータの出現が大きい。高圧インバータはパワーエレクトロニクス応用製品の中では比較的新しく，世界的に見ても製品化されてまだ10年たっていない。富士電機は1999年に発売し，2006年末時点で国内・海外ユーザーに300台以上納入している。

本稿では，富士電機の可変速駆動システムのうち高圧インバータについて紹介する。

## 2　概　要

高圧インバータ「FRENIC4600FM5」（**図1**）は，インバータの出力側に変圧器を設けずに電圧3.3 kVまたは6.6 kVを直接出力することが可能で，高圧電動機をダイレクトに可変速制御できるインバータである。

インバータ出力に変圧器を設けないことで，装置の総合効率を高くすることができ（約97％），より省エネルギーに貢献することができる。

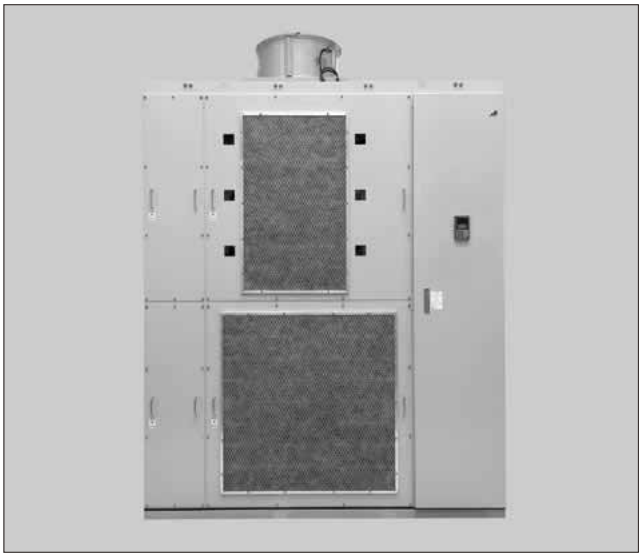
容量範囲は，3.3 kV系で280～3,750 kVA，6.6 kV系で560～7,500 kVAをシリーズ化し，ファン，ポンプ，ブロワ，圧縮機，押出機，ミキサ，短絡試験機などの多用途に適用している。仕様を**表1**に示す。

## 3　特　徴

### 3.1　主回路構成

単相インバータ（インバータセル）を多直列に接続して，それらをスター結線構成にして三相高電圧が出力可能な構成としている〔**図2**(a)〕。インバータセルは，ダイオード整流器とIGBT（Insulated Gate Bipolar Transitor）インバータで構成し，セルの総数が少なく出力の電圧レベル数が多くなるように単相3レベルインバータ方式〔**図2**(b)〕を採用している。2レベルインバータ方式に対してセルの総数を2/3～1/2にしている。

図1　400 kVA高圧インバータの外観



(1)　3.3 kV系

各相のインバータセル数が2直列で計6台のセルにより主回路を構成している。インバータ盤を小型化するために，400 kVA以下ではセルの絶縁構造を見直し，セルを2 in 1構造としてセル数を計3台としている。

(2)　6.6 kV系

各相のインバータセル数が4直列で計12台（800 kVA以下では2 in 1構造として計6台）のセルにより主回路を構成している。

### 3.2　PWM制御

各インバータセルは，5レベルの電圧が出力可能である。3.3 kV系インバータの場合にはセルを2直列の構成としているために出力電圧が9レベル，6.6 kV系インバータの場合にはセルを4直列の構成としているために出力電圧が17レベルとなる。出力電圧のレベル数は他社インバー

**藤本　　潔**

交流可変速駆動設備のプラントエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業プラント本部第一統括部ドライブプロジェクト部担当部長。

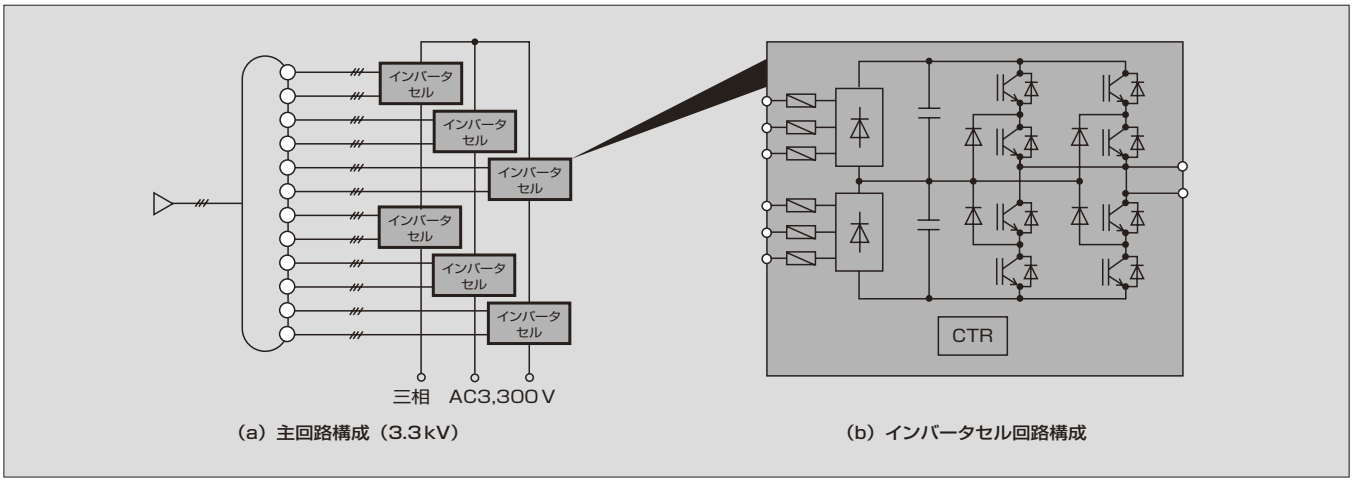
**花澤　昌彦**

交流可変速駆動装置の開発・設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部パワエレ開発センター開発設計部主任。電気学会会員。

表1　高圧インバータFRENIC4600FM5の仕様

| 項　目 | | 3kVシリーズ | | | | | | | | 6kVシリーズ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 出力定格 | 装置容量（kVA） | 280 | 400 | 550 | 825 | 1,250 | 1,875 | 2,500 | 3,750 | 560 | 800 | 1,100 | 1,650 | 2,500 | 3,750 | 5,000 | 7,500 |
| | 最大適用電動機（kW） | 225 | 300 | 450 | 670 | 1,060 | 1,600 | 2,150 | 3,200 | 450 | 670 | 900 | 1,400 | 2,100 | 3,250 | 4,400 | 6,400 |
| | 出力電圧（V） | 3,300 | | | | | | | | 6,600 | | | | | | | |
| | 定格電流（A） | 49 | 70 | 96 | 144 | 218 | 328 | 437 | 656 | 49 | 70 | 96 | 144 | 218 | 328 | 437 | 656 |
| | 過負荷定格 | 定格電流の125％，1 min | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 定格周波数 | 50/60 Hz | | | | | | | | | | | | | | | |
| 入力電源（主電源） | 相数・電圧・周波数 | 三相　3,000/3,300 V　50/60 Hz | | | | | | | | 三相　6,000/6,600 V　50/60 Hz | | | | | | | |
| | 許容電源範囲 | 電圧：±10％（相間アンバランス 2％以内）周波数：±5％ | | | | | | | | | | | | | | | |
| 制御電源 | 相数・電圧・周波数 | 三相　200/220 V　50/60 Hz | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 許容電源範囲 | 電圧：±10％　周波数：±5％ | | | | | | | | | | | | | | | |
| 制御・構造 | 制御方式 | 簡易センサレスベクトル制御付きV/f一定制御 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 出力周波数制御範囲 | 0.2 Hz～50/60 Hz（オプション～200 Hz） | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 冷却方式 | 空冷（天井ファンによる強制風冷） | | | | | | | | | | | | | | | |

図2　主回路構成とインバータセルの回路構成

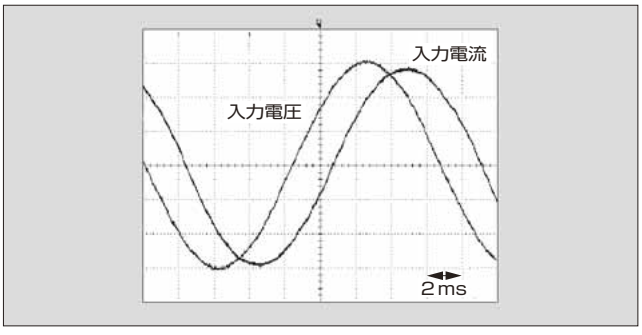



（a）主回路構成（3.3 kV）　　（b）インバータセル回路構成

表2　高調波電流含有率（実負荷試験での測定例）

| 次　数 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 23 | 25 | 35 | 37 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ガイドライン（%） | 4.00 | 2.86 | 1.83 | 1.49 | 1.14 | 1.02 | 0.87 | 0.80 | 0.80 | 0.80 |
| 実測値（%） | 0.58 | 1.0 | 0.20 | 0.32 | 0.75 | 0.54 | 0.06 | 0.24 | 0.58 | 0.27 |

図3　電源側電流電圧波形




タと比べ最も多く，電圧サージの最も低いインバータである。インバータ出力電圧のひずみによる電動機高調波電流および電動機端子に発生するサージ電圧を低減するために，インバータ出力電圧の変化量がセル直流電圧1段分となるように独自のマルチレベルPWM（Pulse Width Modulation）制御を行っている。これにより，既設の商用電源駆動の電動機に対しても出力サージフィルタなどを設置することなく適用可能としている。

### 3.3　電源系統への配慮

インバータの入力側に設置される変圧器の二次側の巻線間に位相差を持たせる構成とすることで，入力電流高調波の低減を図っている。整流相数を業界最多である36相

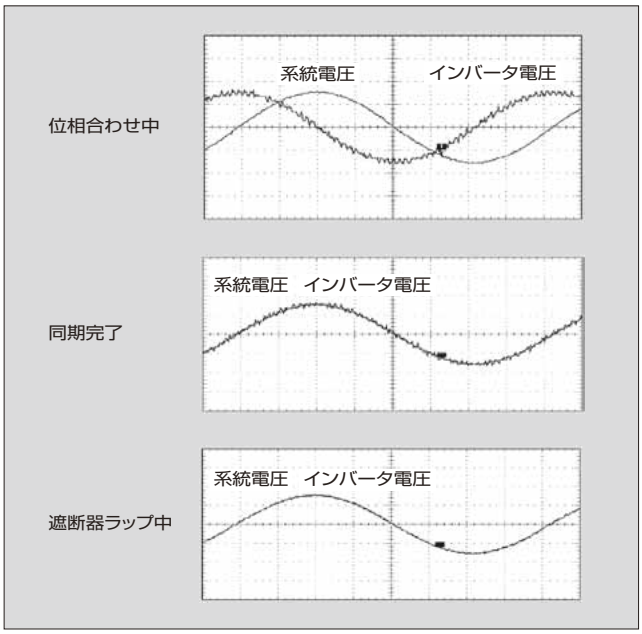
特集

整流相当とすることによって，入力フィルタなどの高調波対策機器を設置することなく，高調波ガイドラインを業界トップレベルでクリアしている（**表 2**）。また，インバータ入力はダイオード整流器を採用しており，電源力率は 0.95 以上となり，力率改善コンデンサなどの設置を不要としている（**図 3**）。

### 3. 4　商用同期投入・解列機能

商用固定速運転用の数百 kW から数千 kW までの高圧電動機を起動する場合，始動電流による系統電圧の低下が問題となることがある。高圧インバータをスタータとして使用することによって対策することを可能とした。高圧インバータにより商用周波数まで加速した後，高圧インバータの出力電圧の位相および振幅を商用電源と一致させ，商用遮断器を投入してからインバータ出力遮断器を開放する無瞬断切換を行うことによって商用遮断器投入時の電源変動を抑制している（**図 4**）。また，商用運転からインバータ運転への同期解列機能も備えているため，負荷の状態による商用運転とインバータ可変速運転の切換を行うことにより装置効率のより一層の向上が可能となる。例えば，複数台の電動機を順次 1 台の高圧インバータにより起動し，起動完了後ショックレスで商用電源に同期投入する応用例を実現した。また，同期電動機駆動用への展開も行っており，10 MW 級電動機のスタータに適用している。同期電動機用スタータ制御，同期投入 / 解列制御を適用した例を，**図 5** に示す。

図 4　同期投入・解列時波形




### 3. 5　瞬時停電対応

ユーザーから，瞬時停電発生時でも運転継続したいとの要求が多くあるが，本インバータでは無停電電源なしで，制御電源用のオプション機器を追加することにより最大 1.2 秒間の瞬時停電に対してインバータ運転を継続することが可能である。系統電源の瞬時停電を検出した場合には，インバータセル内の直流回路の電圧低下を抑制するために減速運転を行い，系統電源復帰後に再加速を行って，瞬時停電発生前の運転速度に復帰する。

### 3. 6　フリーラン起動機能

瞬時停電発生時や負荷機械の影響でフリーラン状態となっている電動機を速度センサなしで起動させる要求が多くある。電動機のインピーダンス特性は電動機回転周波数によって変化することが知られている。電動機にトリガ電圧を印加した場合に電動機に流れる電流から回転周波数をサーチし，インバータの出力周波数をサーチした回転周波数と同期させる独自の方式を用いることによって，フリー

図 5　各種回路図

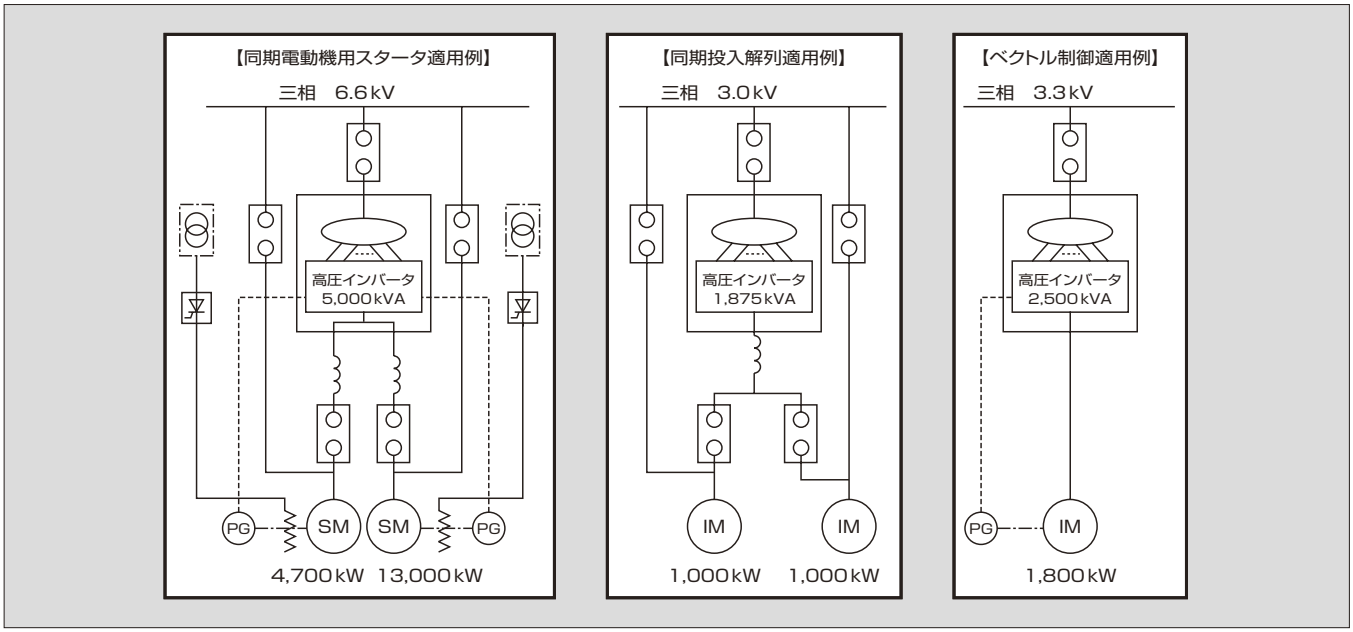
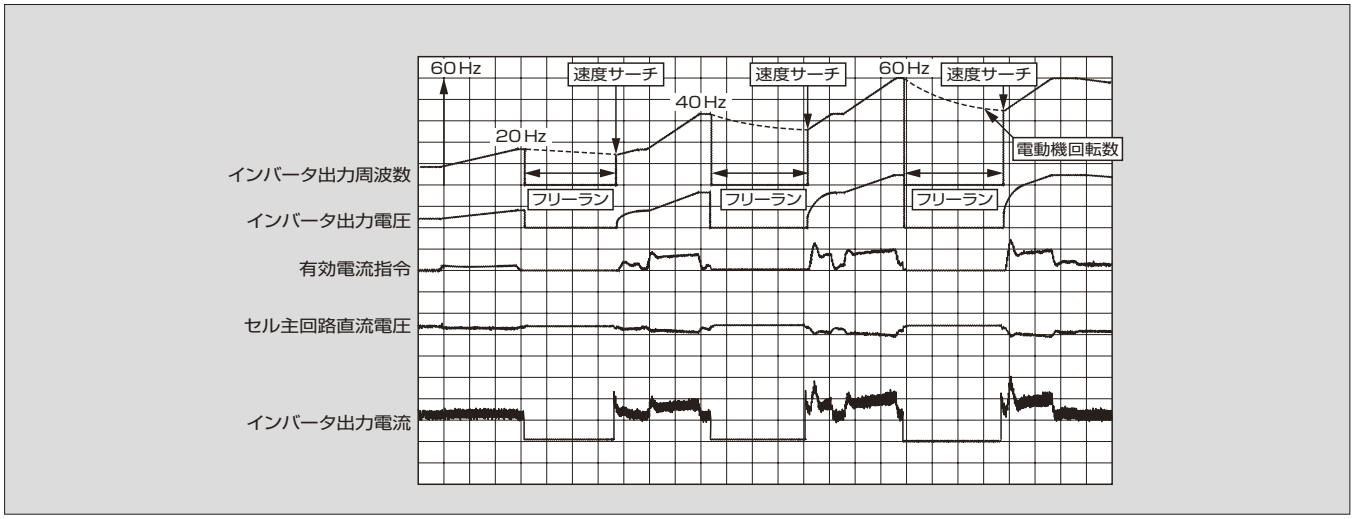


図 6　フリーラン再起動動作




ラン中の電動機をショックレスで起動することを可能にしている（**図 6**）。

### 3. 7　各種制御方式に対応

高圧インバータはファン・ポンプなどの 2 乗低減負荷設備に適用される場合が多いが，このような用途には簡易センサレスベクトル制御機能付き V/f 一定制御を適用している。また，高起動トルク（100 % 以上）や高い速度制御精度（± 0.01 %）が要求される用途に対応するために，速度センサ付きベクトル制御機能を搭載した装置もシリーズ化している。さらに，同期電動機駆動用として位置センサ付きベクトル制御機能を搭載した装置もシリーズ化している。ベクトル制御を適用した例を，**図 5** に示した。

## 4　今後の取組み

高圧インバータは，今後も活発な導入が続くと見込まれている。富士電機は，市場ニーズに応えるべく次の開発を進めている。

(1)　コンパクト化：小スペースへの設置可能

ファン・ポンプなどの 2 乗低減負荷用途に特化し，インバータ盤寸法を大幅に小型化（業界最小）させた新シリーズの製品化を行っている。容量系列は以下のとおりである。

○3.3 kV 系インバータ　390 ～ 5,250 kVA

○6.6 kV 系インバータ　780 ～ 10,500 kVA

(2)　11 kV 級直接駆動：海外ニーズへの対応

3.3 kV 系，6.6 kV 系出力高圧インバータで実績のあるインバータセルを使用し，インバータセルの直列接続数を増やすことにより，11 kV 級電動機をダイレクトに可変速制御することを可能としている。

容量系列は 1,180 kVA，1,680 kVA，2,310 kVA である。

## 5　あとがき

高圧インバータについて紹介した。近年，環境問題への関心が世界的に高まっており，高圧電動機の可変速制御による省エネルギーシステムは一層増えると予想される。富士電機はこれまでの技術と経験を生かし，社会に貢献できる製品を提供し続けていく所存である。

### 参考文献

(1)　鈴木究ほか．スター結線方式による高圧インバータ．平成 11 年電気学会全国大会．no.791, 1999.

# 世界最大級のアルミ電解用整流設備

特集

武藤　和弘（むとう　かずひろ）　　西條　　学（さいじょう　まなぶ）　　森山　琴也（もりやま　きんや）

## 1　まえがき

輸送機械業界を中心に部材の軽量化のため，アルミニウム（アルミ）の需要は，ここ数年間年率平均5％で拡大している。アルミは，周知のとおりアルミナを電気分解することにより生産されるが，その際に多大な直流電力を必要とする。このため，アルミ電解炉メーカーはその消費電力を低減することに日々研究を重ねており，最近では**表1**に示すとおり600MW級の電解炉設備が実用化され，さらに大型化される傾向にある。その直流電力を供給するための変圧整流器も単器の大電流化とさらなる高効率化が要求されている。富士電機では，1960年以来，電解用変圧整流器（以下，Sフォーマという）を技術開発・改良を加えながら製作し続けており，その最先端の高効率・高信頼性のSフォーマは，世界中のユーザーから大きな評価を得ている。このたび，アルコア社の新鋭アイスランド製錬所に世界最大級のダイオードSフォーマ設備を納入したので，その技術内容を紹介する。

## 2　全体システムの概要

このSフォーマはDC1,580V，365kA，576.7MWであり，世界最大級のアルミ電解用電源である。このクラスのSフォーマは従来6台で構成されていたが，コストを下げるため単器容量を従来の1.25倍にアップし，5台構成とした。このうち1台は予備器であるが，運転時の電力ロスを下げるため常時5台で運転される。Sフォーマは電圧調整用変圧器，整流器用変圧器およびダイオード整流器で構成されている。これらの仕様を**表2**に示す。電源システムとSフォーマの構成を**図1**に，変圧器と整流器の工場組合せ試験時の写真を**図2**に示す。

本システムの主な特長は次のとおりである。

(1)　ランニングコストを最小限に抑えるべく，従来にない超高効率（99％）設計とした。

(2)　厳しい高調波規制をクリアするため60相整流方式とし，さらにインピーダンスを最適化して電圧調整用変圧器三次側に高調波フィルタを設置した。

(3)　220kVから電圧調整用変圧器と整流器用変圧器により，1,394V（DC1,580V出力に相当）へ直接降圧し，中間電圧に降圧するための受電変圧器を省略した。

(4)　107タップの負荷時タップ切換器と電圧調整用リアクトルの組合せにより出力電圧をDC0Vから1,580Vまで無瞬断で連続調整することができる。

表1　アルミ電解炉の要求電気仕様

| | 1960年代 | 1990年～現在 | 将　来 |
|---|---|---|---|
| 直流電圧 | 500V | 1,250～1,580V | 1,650V～ |
| 直流電流 | 50～120kA | 315～365kA | 400kA～ |
| 直流電力 | 25～60MW | 393～577MW | 660MW～ |

表2　アイスランド向けSフォーマの単器仕様

| 台　　数 | 5台 |
|---|---|
| 変圧器一次電圧 | AC220kV，三相，50Hz |
| 変圧器二次電圧 | 0V～R1,394V～F1,539V |
| 変圧器三次電圧 | 33kV |
| 変圧器容量 | 173.9MVA |
| 変圧器タップ数 | 107タップ |
| 変圧器冷却方式 | 導油風冷式（ODAF） |
| 直流電圧 | DC0～1,580V |
| 直流出力電流 | 0～91.3kA |
| 定格の種類 | 100％連続，150％，1分 |
| 電力変換方式 | 三相ブリッジ接続×4群（単器12相整流） |
| 使用整流素子 | 5kV，3.5kA，ダイオード |
| ダイオード構成 | 1S10P6A4G（1P冗長あり） |
| 整流器冷却方式 | 送水風冷式（WFAF）不凍液閉鎖循環方式 |
| 周囲温度 | −30～+40℃ |

## 3　変圧器

変圧器は，電圧調整用変圧器と整流器用変圧器から構成

**武藤　和弘**

産業用大容量変換装置のプラントエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業プラント本部第一統括部パワエレシステム技術部。

**西條　　学**

変圧器の設計・開発に従事。現在，株式会社日本AEパワーシステムズ変圧器事業部設計部技師。

**森山　琴也**

整流器の設計・開発に従事。現在，株式会社日本AEパワーシステムズ変圧器事業部変換装置部。

図 1　電源システムと S フォーマの構成

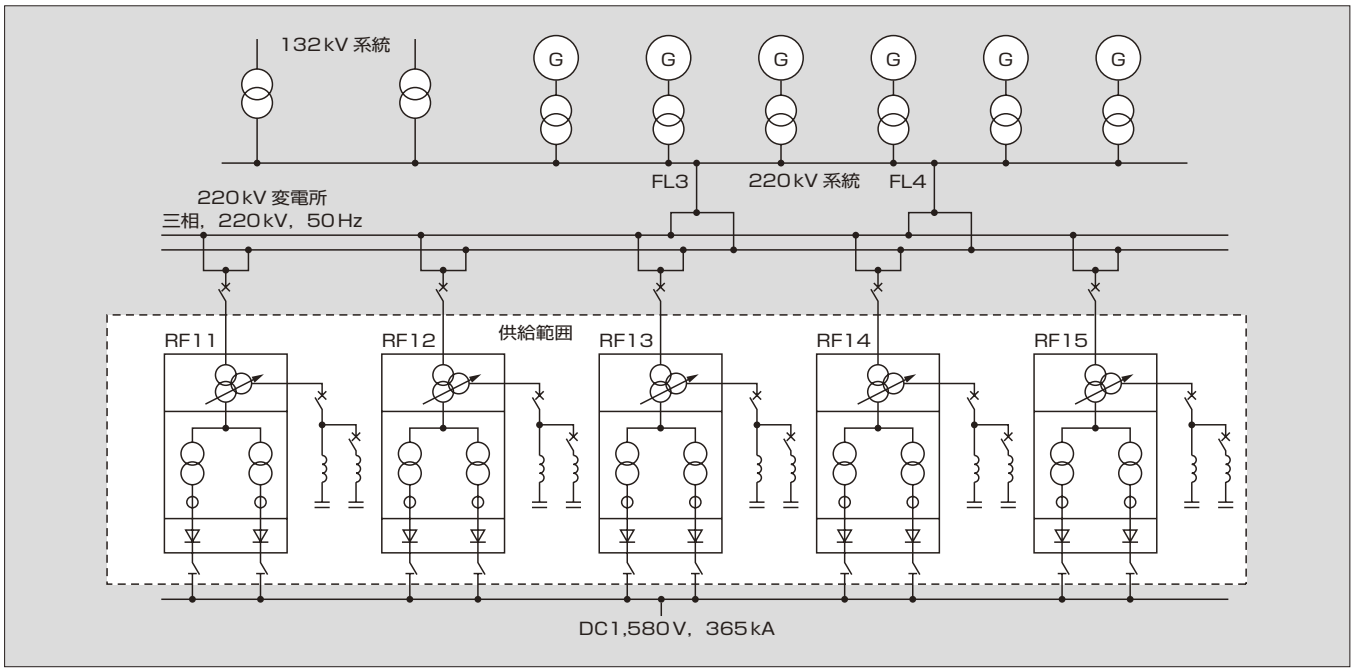



図 2　工場組合せ試験時の写真

され，アルミ電解用としては世界最大級の容量を持つ。さらに以下に示す多くの特長を持つ。

### 3. 1　超低損失・高効率・低騒音

超低損失・高効率・低騒音は，

(1)　高性能方向性けい素鋼板の採用

(2)　電流密度の低減

(3)　渦電流損の小さい巻線の採用

(4)　厳密な磁界解析に基づくタンク磁気遮へい板の採用

によって，このクラスの変圧器（電圧調整用変圧器に分離巻線を採用）としては，従来にない低損失・高効率を実現した。**表 3** に，この変圧器の効率比較を示す。

また，超低損失・高効率とあわせて，励磁騒音およびインピーダンス騒音ともに，ステップラップ接合方式や磁束密度の最適化などの中身構造および外部構造の適正化により，組合せ時における励磁騒音とインピーダンス騒音の合成で 75 dB という低騒音を実現した。

表 3　変圧器の効率比較

| | 電圧調整用変圧器 | 整流器用変圧器 |
|---|---|---|
| 今回実現した効率（%） | 99.7 | 99.7 |
| 通常損失での効率（%） | 99.4 | 99.3 |

### 3. 2　分離巻線方式電圧調整用変圧器

通常，電圧調整用変圧器は比較的小さい巻数比のため，より経済的な単巻変圧器が用いられることが多い。しかし，今回は電圧調整用変圧器三次側に高調波フィルタを設置し高調波を低減させるため，運用範囲の各タップにおける三次巻線分離インピーダンスの変動を極力抑える必要があった。そのため，分離巻線方式の電圧調整用変圧器を採用した。

**図 3** に分離巻線方式での各タップのインピーダンス変化例，**図 4** に単巻方式での各タップのインピーダンス変化例を示す。両図の破線に示すとおり，分離巻線方式のほうが三次巻線分離インピーダンスの変動を小さくできることが分かる。

### 3. 3　負荷時タップ切換器

これまで 0 ～ 100 % の電圧調整は，3 ～ 4 タップの無電圧タップ切換器（NVTC）と 35 タップ程度の負荷時タップ切換器（OLTC）を組み合わせて実現していた。そのため NVTC を切り換える際に電源を一度開路する必要があり，再投入時に励磁突入電流が発生していた。

今回の設計では 107 タップの OLTC を採用し，NVTC を用いることなく電圧切換をスムーズに行うことができる。そのため 0 ～ 100 % の電圧調整を無瞬断で実現することができ，励磁突入電流の影響を軽減することが可能となった。107 タップを実現するため，**図 5** に示すように複数の

粗タップ（6 セクション）と一つの密タップ（18 セクション）を持つ結線を採用している。

### 3. 4　解析技術

今回の電圧調整用変圧器は受電電圧が 220 kV であり，産業用の変圧器としては最高クラスであることおよびその中間電圧が高いことから，一次巻線および中間電圧巻線の絶縁技術が非常に重要になってくる。特に中間電圧巻線は，通常の変圧器と比較すると，**図 5** の結線図に示すとおり 107 タップを実現するために複数の粗タップと一つの密タップから構成されており，非常に多くの端子がある。このため中間電圧巻線の絶縁について，印加端だけではなく各端子における電位分布・電界分布を正確に把握することが必要である。以下，解析結果の代表例について紹介する。

(1)　各端子の電位振動解析

変圧器巻線をインダクタンス・キャパシタンスの電気的な等価回路にし，それに付け加え巻線導体や鉄心渦電流損や誘電体損失などの減衰分を考慮した自社開発のプログラムにより電位振動のシミュレーションを実施した。

シミュレーションの内容は，220 kV 側から印加したときの各端子の電位分布・中間電圧端子への移行電圧および中間電圧端子から印加したときの電位分布である。その代表例として，**図 6** に中間電圧端子から印加したときの結線モデル，**図 7** に印加波形，**図 8** に A24 端子－大地間，**図 9** に A23 端子－大地間の発生電位を示す。

なお，巻線製作工程完了時にアナライザ測定を実施し，

図 3　分離巻線変圧器のインピーダンス変化例

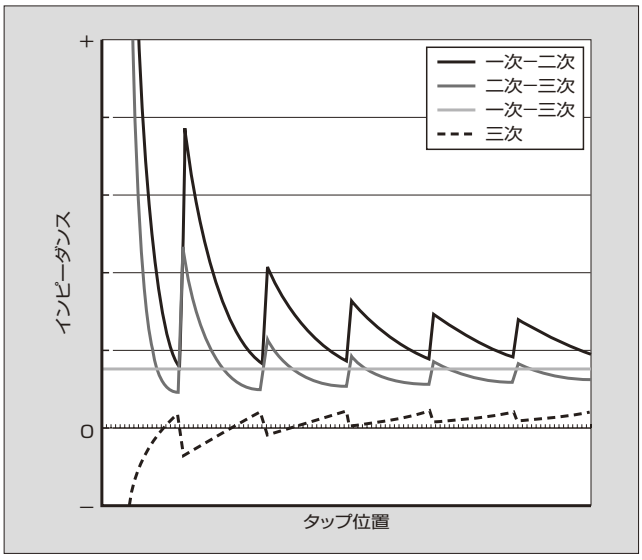



図 4　単巻線変圧器のインピーダンス変化例

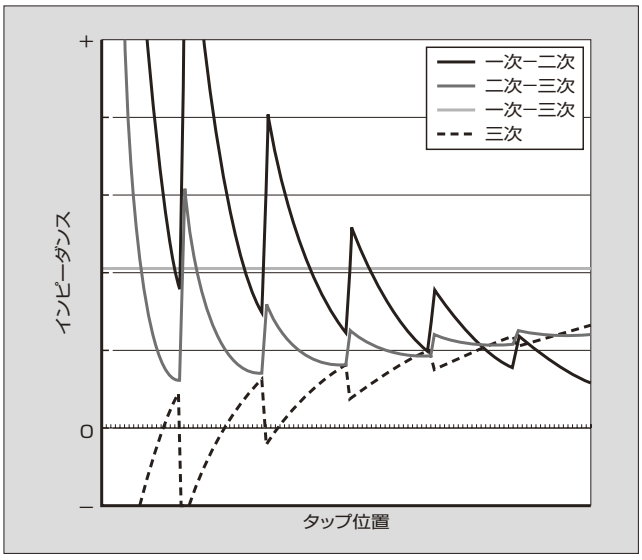



図 5　電圧調整用変圧器の結線図

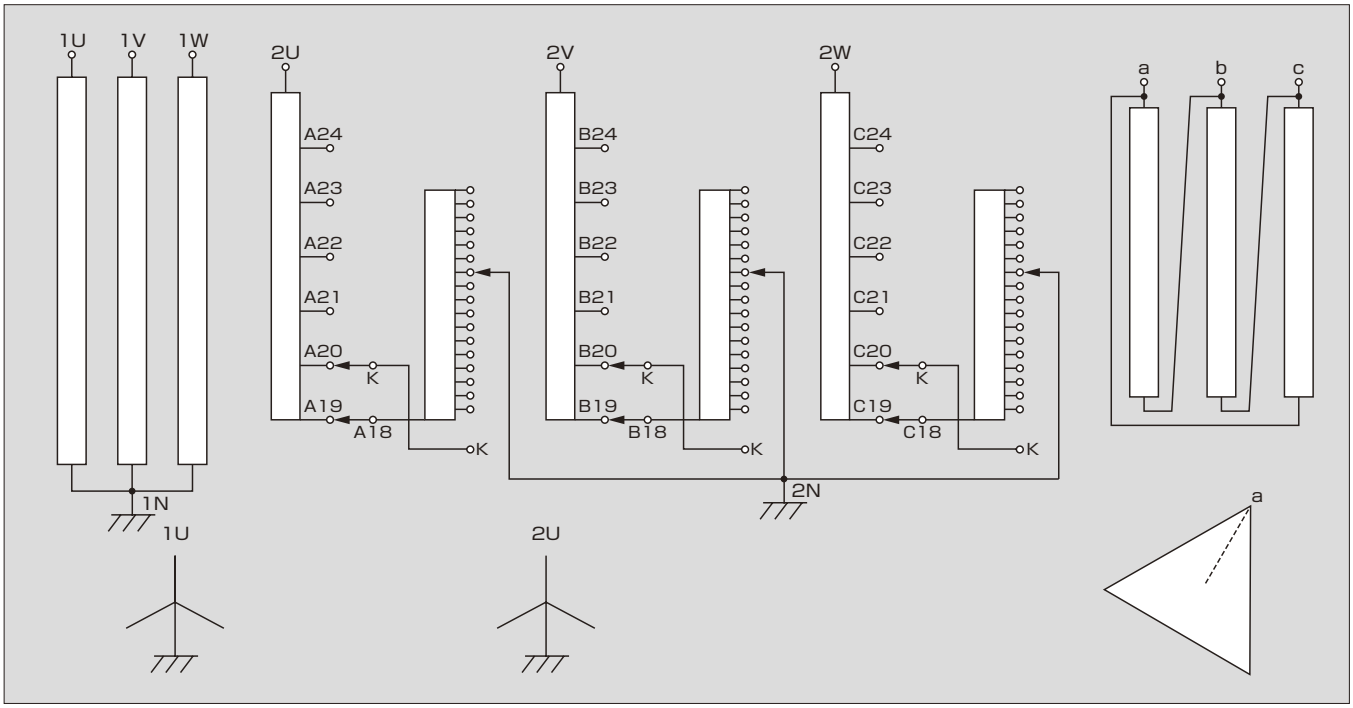


図 6　中間電圧端子から印加する結線モデル

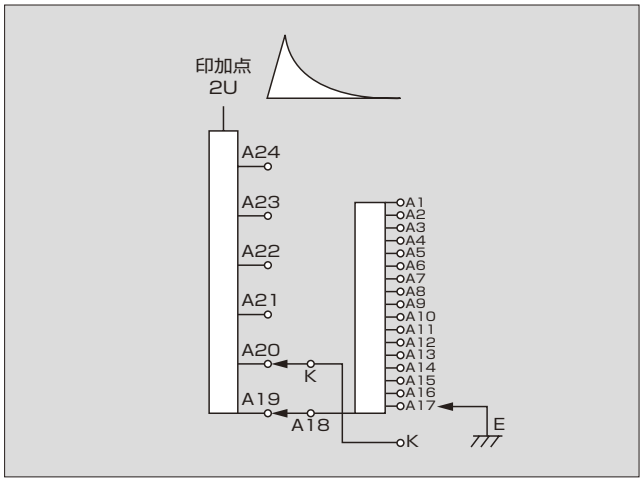



図 7　2U 端子ー大地間の発生電位（印加波形）

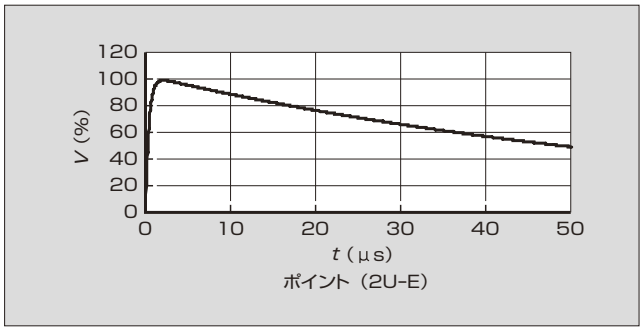
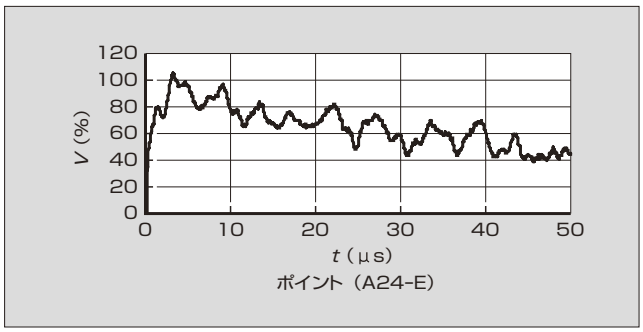



図 8　A24 端子ー大地間の発生電位




シミュレーション結果と実測値がほぼ合っていることを確認した。

(2)　電界解析

有限要素法で計算する自社開発のプログラムにより，上記電位振動解析結果に基づいた各端子の電位を入力とし，各巻線部の電界強度をシミュレーションした。代表例として**図 10** に一次巻線とタップ巻線間の電界分布を示す。一次巻線－タップ巻線間だけでなく，各端子間の電界強度をシミュレーションし，各部の電界強度が許容値以下であることを確認している。

上記に加え，各タップでの磁界分布解析，インピーダンスの計算，機械的強度の計算および渦電流損の計算を行い，その結果を考慮した電圧調整用変圧器の最適設計を実施した。

図 9　A23 端子ー大地間の発生電位

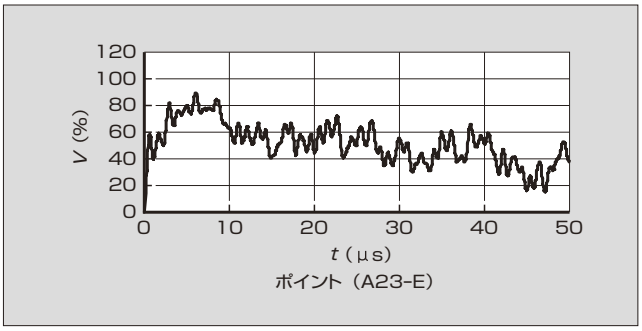
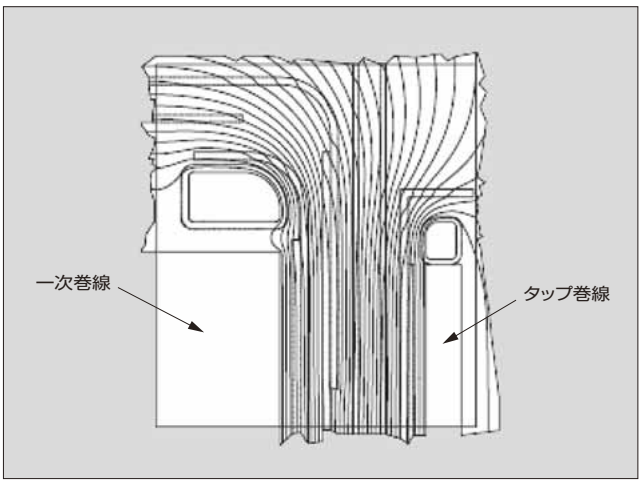



図 10　一次巻線とタップ巻線間の電界分布




### 3. 5　光ファイバ温度センサ

電圧調整用変圧器および整流器用変圧器の巻線内に光ファイバ温度センサを設置している。従来，巻線温度は温度上昇試験時に電気抵抗法により平均温度を測定し，最高温度は計算により求めていたが，この温度センサにより，巻線内の最高温度を直接的に測定することができる。これにより，今までは計算でしか求められなかった最高点温度を直接測定でき，変圧器の運用状態の監視がより正確にできるようになっている。

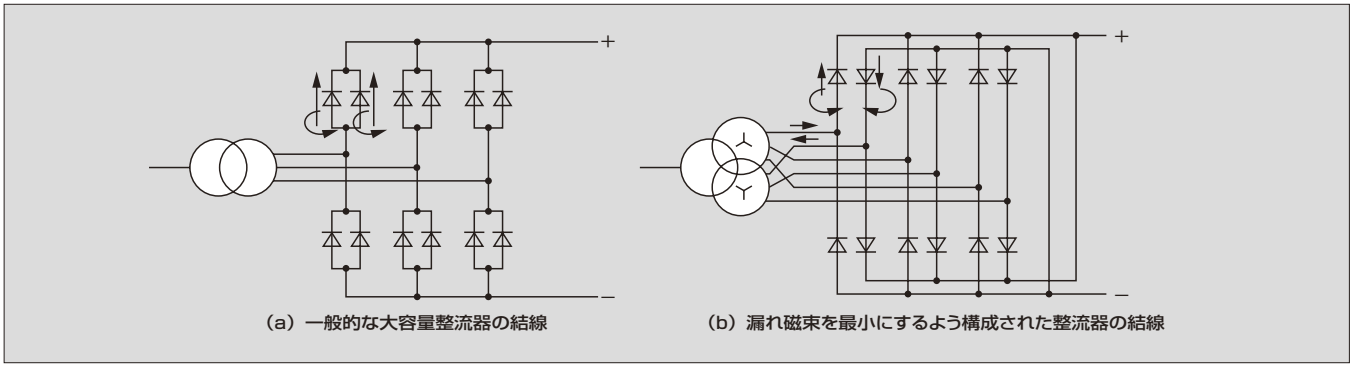
## 4　整流器

整流器の仕様は**表 2** のとおり，直流出力の電圧・電流が最大級であることに加え，寒冷地などの特殊条件も加わっている。以下にそれらを達成するために行った技術について述べる。

### 4. 1　大電流による漏れ磁束の抑制

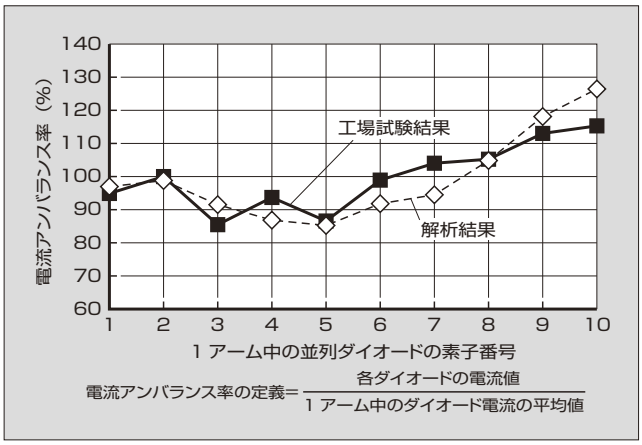
大電流の整流器であるため，磁束による周囲金属の局部過熱対策は重要な課題である。富士電機の整流器では，変圧器二次リードから整流器の直流集電部までの漏れ磁束を最少化させる同相逆並列接続という独自技術を適用している。**図 11** にこの接続の比較概念図を示す。これは電気回路的にまったく同じ二組の整流器を物理的に表裏一体で近

図 11　一般的な大容量整流器の結線と同相逆並列結線（概念図）




（a）一般的な大容量整流器の結線　　（b）漏れ磁束を最小にするよう構成された整流器の結線

図 12　並列ダイオード間の電流アンバランスの解析と工場試験結果




接配置し，それぞれの電流を逆の方向とすることで発生する磁束を打ち消す技術である。

これにより，

(1)　強度・経済性に優れた鉄製のキュービクルの適用

(2)　並列ダイオード間の電流アンバランスの原因となるインダクタンスの低減

が可能である。

### 4. 2　並列ダイオード間の電流アンバランスの解析と並列数の決定

本装置では後述する寒冷地対策のため，従来の純水に替え冷媒に不凍液を適用している。そのためダイオードの冷却効率が低下していることに加え，装置自体の定格電流も増加していることにより，従来は最大 8 並列であったダイオードの並列数をさらに増やす必要があった。

一方，並列ダイオード間には物理的な構成上生じるインダクタンスの違いと個々のダイオード特性の違いにより電流のアンバランスが生じるため，並列数の算出はこのアンバランスも考慮して決定しなければならない。

製品設計にあたって，それら二つの条件を考慮した数値解析[(1)]を実施し，電流アンバランス率の最大値を評価した。その結果，特にリアクトルなどの電流バランス調整部品を具備することなく，電流アンバランスを ± 30 % 以内に収めることが可能であることを確認し並列数を 10 と決定した。

**図 12** に解析結果と工場試験時における実測結果を示す。工場試験結果は，解析結果とよく一致し，かつその解析で求められたアンバランスの範囲内に収まっていることを確認した。

### 4. 3　導体の振動対策

並列数が 10 となったことでダイオード実装部のバスバーは従来に比べ約 16 % 長くなり，電流自体も従来より増えているため，装置の運転振動による周辺取付け部品への影響を確認する必要が生じた。そこでデジタルシミュレーションによる振動解析を実施した。

解析は，①回路全体の振動解析を実施して対策が必要な箇所のめどをつける，②さらにその箇所をモード解析することによって振動成分の詳細解析と強化対策の検討を実施する，という手順で実施し，最終的には工場試験時に実際の振動を確認した。

デジタルシミュレーションによる整流器主回路全体の計算モデルを**図 13** に，その振動解析結果を**図 14** に示す。**図 14** から，振動箇所は各相を連結している直流側の集電導体が大きくなっており，対策が必要であることが分かった。このため直流集電導体のモード解析を実施し，振動の応答特性の解析と補強箇所の最適性の評価を行った。モード解析モデルを**図 15** に，その解析結果を**図 16** に示す。補強により 100 Hz の点で 1/4 以下に振動が低減しており，さらに電源周波数（50 Hz）の倍波長に対する応答も低減している。

これらの効果を確認するため，最終的には工場試験時において補強前後の条件で振動を測定した。製品の工場試験時における運転振動の測定結果を**図 17** に示す。補強対策は基本周波数から 250 Hz までの倍波長に対して効果があり，周辺部品に対する要求仕様（1.0 G 以下）を満たすとともに，最大でも 0.6 G 以下に抑えられることを確認した。

### 4. 4　低温対策

整流器の導体や冷却体は純水によって直接冷却するが，今回は周囲温度が − 30 ℃ ～ + 40 ℃ という広範囲の仕様であるため，高温での冷却効率を確保する一方で，低温での凍結対策を行わなければならない。そのような場合，従来は冷媒としてエチレングリコール水溶液を適用していたが，

今回は環境への影響を配慮し，食品の添加物としても使用されるプロピレングリコール水溶液を採用した。

特にプロピレングリコールはエチレングリコールに比べて低温での粘性が高いため，粘性による冷媒流量の変化を考慮した計測機器の設定を実施するとともに，粘性が高くても始動が可能であるポンプの仕様や配管設計を考慮している。

### 4.5　工場組合せ試験

前述のさまざまな課題を検証することおよび機器総合効率を評価するためには，変圧器と整流器の組合せ試験を行うことが必要である。組合せ試験を現地で行うことは，試験用電源や工場と同じ高精度の測定器を用意しなければならず，現実的とは言い難い。富士電機では，S フォーマの組合せ試験を実施しており，顧客立会い試験もこの状態で実施した。今回の組合せ試験では，電圧調整用変圧器と整流器用変圧器，ダイオード整流器を，製作工場にて実際と同じ状態で接続・組み合わせて短絡試験を行い，電力損失・各部温度上昇・騒音を測定して，所定の要求性能が得られることを確認した。なお，短絡試験のため変圧器の無負荷損は発生しないので，別途測定した無負荷損を計算で補正している。

図 13　振動解析モデル

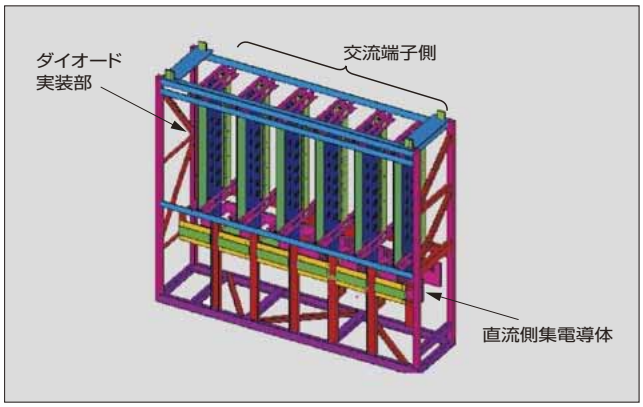
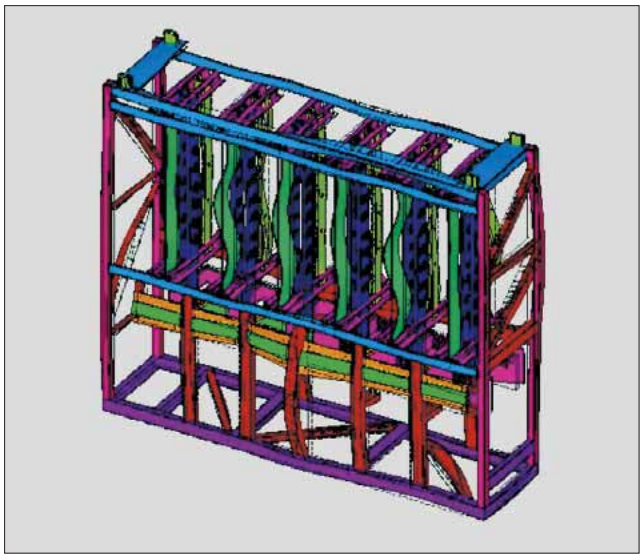



図 14　振動解析結果



## 5　高調波と力率

S フォーマ設備から電源側へ流出する高調波は，IEEE 519 の規制値を満足している。その規制値を**表 4** に示す。大容量整流設備においては高調波の低減と力率の改善は大きな課題である。アルミ電解設備の場合は，下記の条件

図 15　モード解析モデル

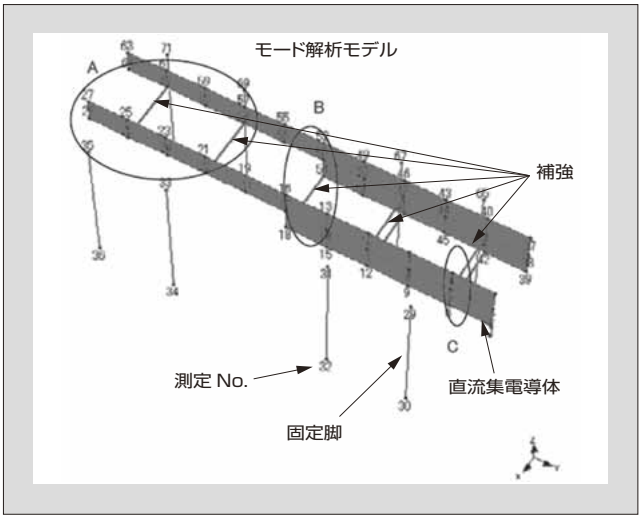



図 16　モード解析による補強の効果の検討結果

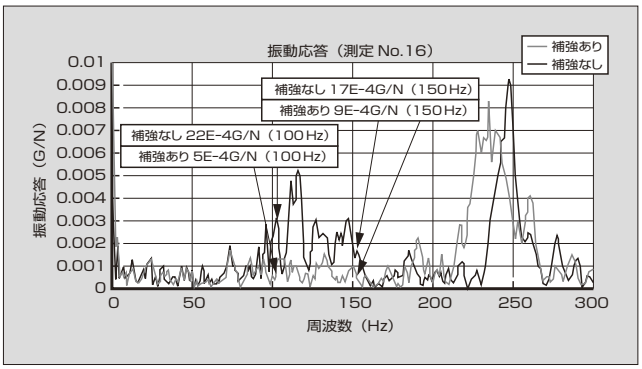
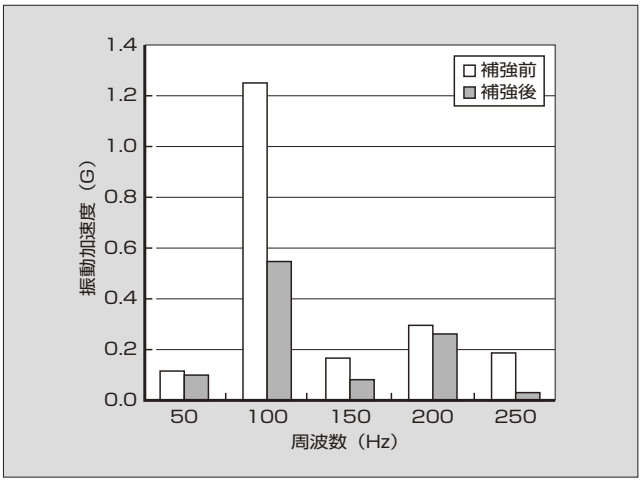



図 17　製品の工場試験時における運転振動の測定結果



を踏まえ，高調波フィルタ（力率改善を兼ねる）の設置場所・構成を検討しなければならない。

(1)　電源の高調波インピーダンスの影響を極力受けないようにする。

(2)　アルミ電解設備は1時間以上の停電は絶対に許されないため，高調波フィルタにおいても予備器が不可欠である。

(3)　負荷の大きさに従って力率をある程度調整可能にする。

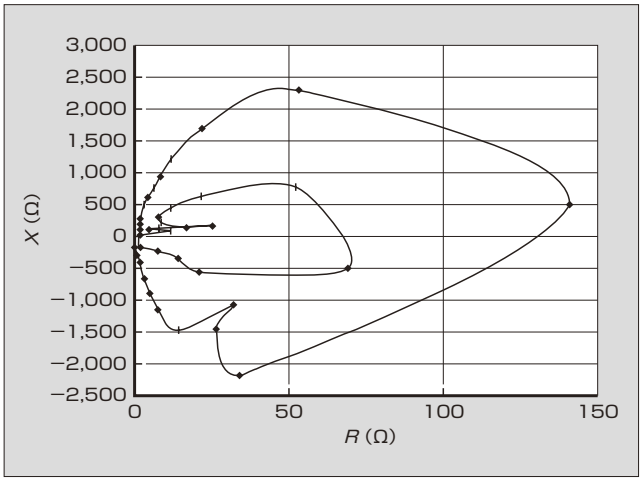
### 5.1　電源高調波インピーダンスの解析

220 kV 電源設備は**図1**に示すとおり，6台の115 MW水力発電設備と132 kV系統に接続されている2台の75 MVA変圧器から構成されている。電解工場には電源設備から2回線で送電されている。今回の計画は発電設備も新設することになっており，電源設備の運用上その容量と負荷容量がおおむね1：1の関係にある。電源短絡容量はスタートアップ時370 MVA，定常時1,300 MVA，最大時2,300 MVAと変化する。このため，220 kV系統の運用条件，発電機のインピーダンス，変電設備のインピーダンス，送電線のインピーダンス，132 kV系統条件を考慮し，電源高調波インピーダンスの解析を実施した。高調波インピーダンスは電源設備の運用を考慮して，基本波から50次までの抵抗分とリアクタンス分を**図18**のとおりルーカスインピーダンス（一例）で表し，次節で紹介する高調波フィルタの設計条件とした。

**表4**　IEEE 519-1992 Harmonic Current Limits for Non-Linear Loads at Point of Common Coupling (PCC) for Voltage＞161 kV

| $I_{SC}/I_L$ | Maximum Harmonic Current Distortion for Individual Odd Harmonic Order (Percent of $I_L$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ＜11 | 11≦$h$≦17 | 17≦$h$≦23 | 23≦$h$≦35 | 35≦$h$ | TDD |
| ＜50 | 2.0 | 1.0 | 0.75 | 0.30 | 0.15 | 2.5 |

図18　220 kV系統ルーカスインピーダンス（一例）




### 5.2　高調波フィルタの構成

前述の条件から各電圧調整用変圧器を分離巻線方式とし三次巻線を設けて，**図1**に示したとおりおのおのに高調波フィルタを設置するシステム構成とした。これにより5台中1台の高調波フィルタは予備器とすることができる。このシステムは変圧器単体としてはコストが高くなるが，高調波フィルタを含めたシステム全体を考慮すると，経済的であることと運用的にも自由度が高い。ただし，整流器から発生する高調波を吸収するためには，電圧調整用変圧器の一次側分離インピーダンスを大きくしながら三次巻線分離インピーダンスをできるだけゼロにすることが必要である。さらにこれらのインピーダンスは，タップの位置にかかわらず一定にすることが望ましく，巻線の配置や高さ・幅をそれぞれ調整することによって，三次巻線分離インピーダンスの変動が最小となる構成を実現している。

高調波フィルタの構成は，2，3，4，5，7，11次の計6分路構成としている。運転時において，2，3，4次フィルタは，電源側への高調波流出に対しほとんど効果がないが，他器を系統へ接続したときに発生する励磁突入電流に含有された低次高調波の拡大を防止するために設置した。

### 5.3　力　率

力率の規制値については工場全体の負荷容量を考慮して−0.98（進み）～＋0.98（遅れ）であり，それに加え電源系統が非常に弱いため，高調波フィルタ設備を投入したときにおける220 kV系統の電圧変動率の厳しい指定があった。

アルミ電解負荷の特徴は，電解炉立上げ時の電圧が数V，365 kAであり，その後順次電解炉を増加して，DC1,580 V，365 kAに至るまで約6か月かけて運転を停止することなく段階的に上昇していくことである。この立上げ期間中においても可能な限り力率の規制値を守りながら，電圧変動率を抑えるために，高調波フィルタを低次と高次の二つに分け，遮断器により順次投入・開路できるようにした。

## 6　あとがき

世界最大級のアルミ電解用整流設備について紹介した。アルミの需要は今後も増加する見通しであり，さらに設備が大容量化していくと思われる。今後のアルミ電解炉の要求仕様に合わせて，今までの技術をさらに洗練させ，より経済的でかつ信頼性の高い整流設備を提供していく所存である。

### 参考文献

(1)　古木進一，石塚銀治．アルミ電解用整流装置（Sフォーマ）．富士時報．vol.74, no.5, 2001, p.296–301.

(2)　神尾明．大容量整流装置の発生する高調波とその抑制対策．富士時報．vol.69, no.12, 1996, p.626–629.

# フリッカ補償システムの最新制御技術



宇都　克哉（うと　かつや）　篠原　博（しのはら　ひろし）　鈴木　明夫（すずき　あきお）

## 1　まえがき

パワーエレクトロニクスを駆使した静止型フリッカ補償装置（SFC）には，サイリスタを用いた他励式 SFC，および自己消弧デバイス（IGBT など）を用いた自励式 SFC がある[(1)]。

他励式 SFC の特徴は大容量器として経済性に優れていることであり，フリッカ補償と同等に長周期電圧変動補償が欠かせない大容量製鋼アーク炉に対しては有効である。自励式 SFC は系統電圧に対するインバータ電圧の振幅と位相を制御することにより，進相・遅相無効電力だけでなく逆相電力，さらには高調波補償も可能であり高機能のフリッカ補償を可能としている。

フリッカ補償だけでなく電圧変動をも含めた「電気の質」が要求されている現在，他励および自励の両特性を追求したハイブリッドシステムが注目されている。

本稿では，他励式 SFC の最新技術であり，最適補償効果を可能とした補償ゲインのオートチューニング機能，およびハイブリッドシステムを可能とした自励式 SFC の最新制御技術について述べる。

## 2　他励式 SFC 制御技術

### 2.1　ハードウェア構成

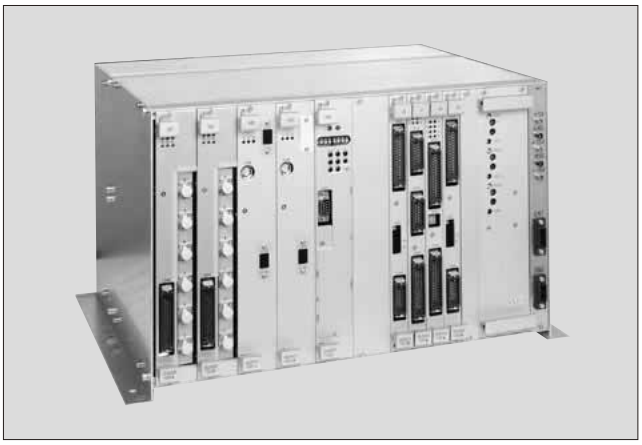
他励式 SFC の制御装置ハードウェアには，従来の制御装置に替え，最新のプロセッサを採用したデジタル式制御装置を適用した。この制御装置は，①演算の高速化，②多様なプラント仕様への対応，③ソフトウェア開発の効率化，④ RAS（Reliability，Availability，Serviceability）機能の充実，といった特徴を持ち，主に電力や一般産業向けの大容量変換装置に適用することを目的としている。特に，システムの保守性を高める RAS 機能としては，次の 2 点がある。

(1)　自己診断機能：運転中のシステム監視を行うことで，何らかの原因でプロセッサが故障した場合でも，システムを暴走させることなく速やかに停止させることができる。

(2)　トレース機能：アナログ信号・デジタル信号・点弧パルス信号の変化を 1 μs の分解能で記録することで，異常現象発生前後の情報を用いた故障解析を容易にできる。

制御装置の外観を**図 1** に示す[(2)]。

図 1　他励式 SFC 制御装置の外観



### 2.2　制御方式

他励式 SFC の制御ブロック構成を**図 2** に示す。他励式 SFC は，アーク炉から発生する無効電力を補償することでフリッカを抑制する。このため，制御装置では系統電圧とアーク炉電流を検出し，アーク炉から発生する無効電力の演算を行い，この無効電力を打ち消すために，点弧パルス位相を演算して無効電力を出力する。ここで，ランダムに変動する無効電力によって発生するフリッカを効果的に補償するため，無効電力演算の後段に補償ゲインを設けている。この補償ゲインは，系統電圧とアーク炉電流から演算する無効電力の演算誤差を補正する機能であり，これまでの経験から，アーク炉の操業状態やフリッカ発生量によって，最適値が異なることが分かっている。例えば，重負荷時（フル操業時）で調整したゲインでは，軽負荷時には改善効果が低く，また逆に，軽負荷時に調整したゲインでは，重負荷時に所望の改善効果が得られないといったこ

**宇都　克哉**

産業用電源設備のエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業プラント本部第一統括部パワエレシステム技術部担当部長。

**篠原　博**

パワーエレクトロニクス，大容量電力変換装置の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員。

**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，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員。

特集

とがある。そこで今回，この補償ゲインを自動調整するためのオートチューニング制御機能を実装することで，効果的な補償を可能とした。この補償ゲインオートチューニング制御機能は，三つの異なる補償ゲインで補償した場合でのフリッカを演算し，最もフリッカを低減するゲインを選択する制御方式である。つまり制御装置内に，実際の系統を模擬した3台の系統モデルを設け，それぞれ異なる補償ゲインで他励式SFCを動作させ，アーク炉電流を補償した場合におけるフリッカを演算し，その結果，最大の補償効果が得られるゲインを実際の補償ゲインとして逐一更新させる方式である。

この補償ゲインオートチューニング制御を適用した場合の動作波形を**図3**に示す。本図から，アーク炉電流が増加してフリッカが多くなった場合（**図3**の①）には補償ゲインを下げ（同②），また，アーク炉電流が減少しフリッカが少なくなると（同③）補償ゲインを上げる（同④）ように制御され，その結果，系統電圧の変動を抑制し，安定した電圧となっていることが確認できる。また，一般にフリッカは1分間の平均値として定義されているが，本制御では，任意時間の平均値でのフリッカを演算することが可

図2　他励式SFCの制御ブロック構成

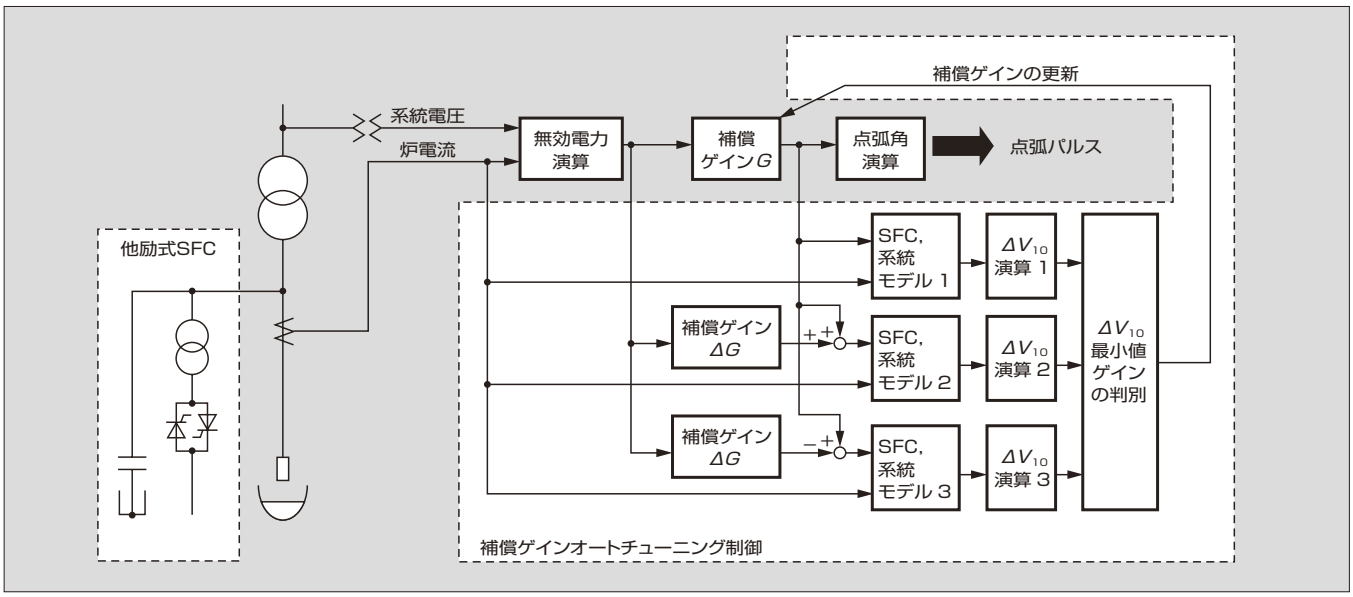
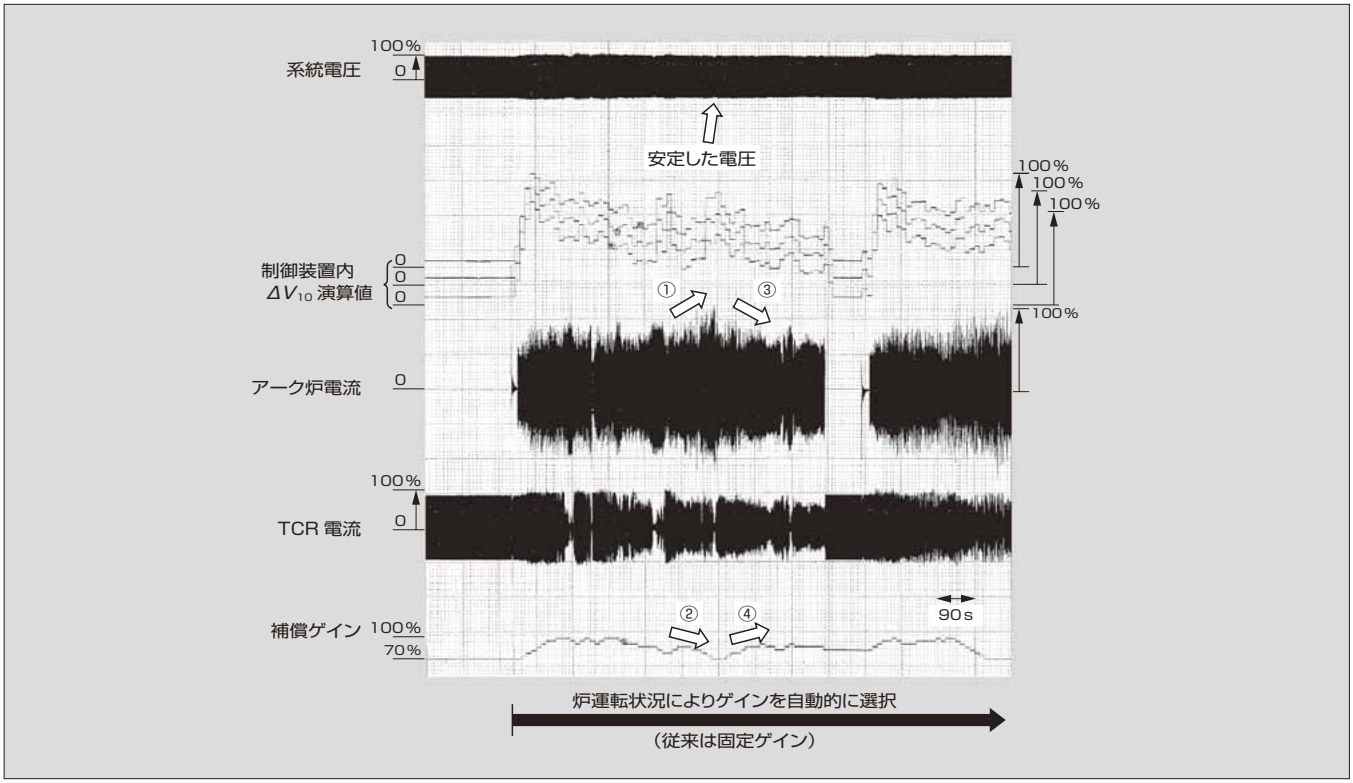



図3　オートチューニング制御動作波形



能であり，短時間でのチューニングを可能としている。**図3**の動作波形では，20秒平均でのフリッカを演算した結果を用いてチューニングした結果であるが，通常の1/3の時間で演算しても，十分なチューニング効果が得られていることも確認できる。

以上，本制御機能により，最適な補償性能（従来比110％）が得られるとともに，現地での調整期間を大幅に短縮できるため，据付けから稼動までの期間短縮の効果もある。

## 3　自励式SFC制御技術

### 3.1　ハードウェア構成

自励式SFCの制御装置は，多重化された複数台のインバータを制御するために，制御演算を行うメイン制御ユニットと，各インバータのゲートパルスの生成，および分配を行うパルス分配ユニットから構成され，ユニット間を高速のシリアル伝送で接続している。また，高速なフリッカ補償成分演算と電流制御を実現するため，最新の32ビット浮動小数点DSP（Digital Signal Processor）を採用している（従来比2倍の演算速度）。RAS機能やトレース機能も，他励式SFC制御装置と同等の機能を搭載している。

### 3.2　制御方式

自励式SFCの制御ブロック図を**図4**に示す。自励式SFCは，以下のような制御を行っている。

(1)　フリッカ補償成分分離・選択演算

負荷電流（アーク炉電流）を，*dq*変換と移動平均を用いて，正相無効成分，逆相成分，および高調波成分に分離している。この分離した各電流成分が，装置容量内である場合はすべて補償を行い，装置容量を超過する場合には，各電流成分にフリッカ発生の主要因となるものから順位を付けて，順位の高いものから優先してフリッカ補償電流指令としている。このことから，負荷容量に対して小さな装置容量でも効率的なフリッカ補償を可能にしている。

図5　ハイブリッドシステム例1

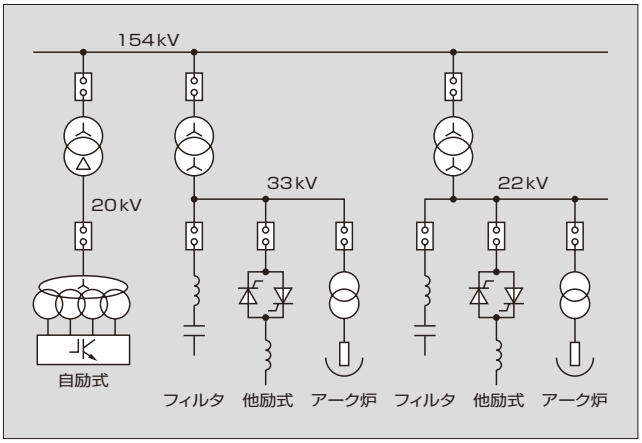



図6　ハイブリッドシステム例2

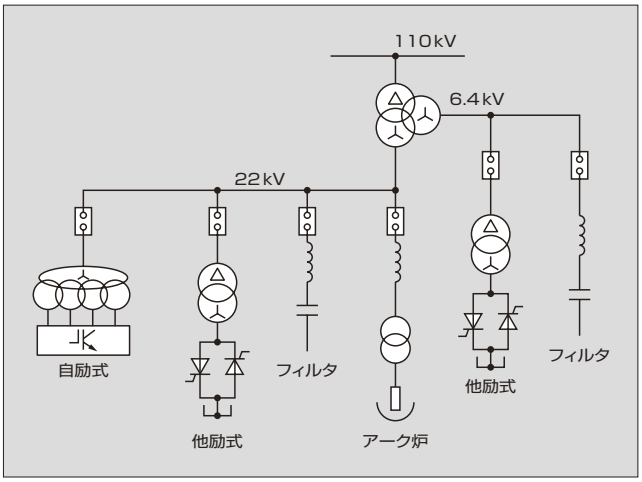



図4　自励式SFCの制御ブロック図

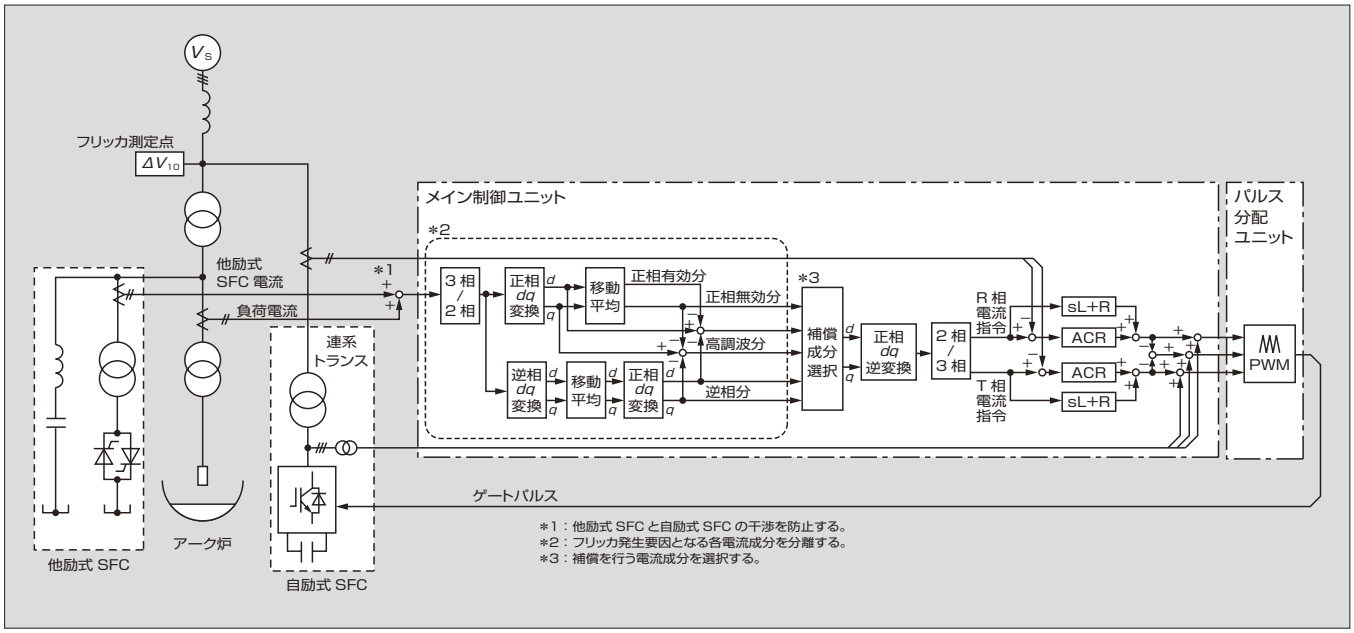
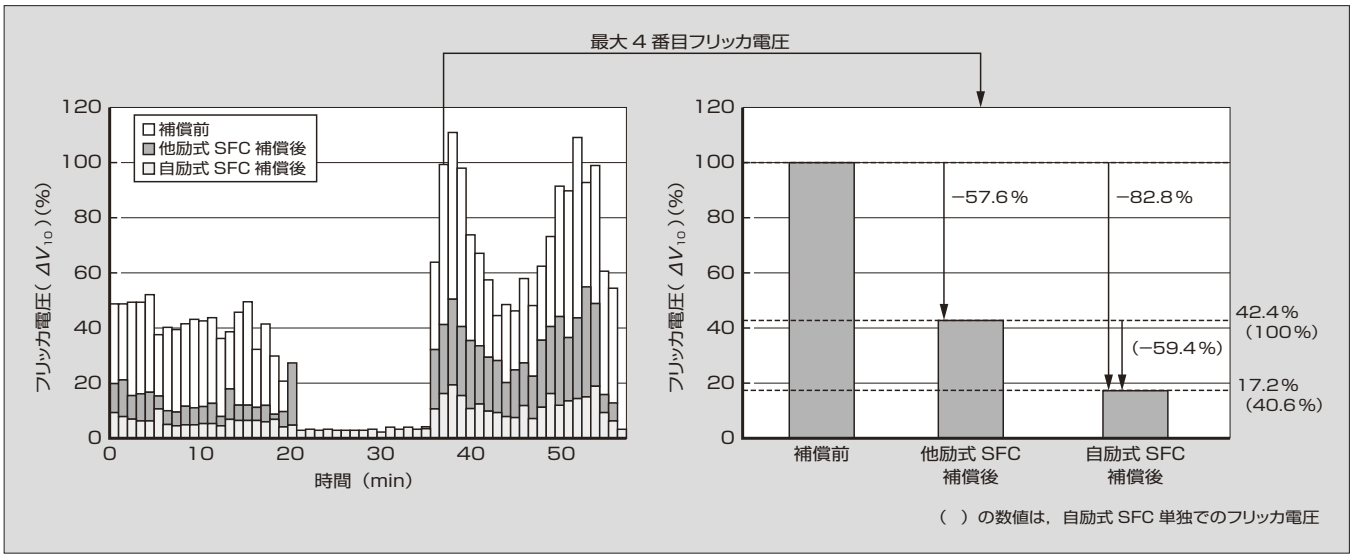


図 7　フリッカ補償結果




(2)　電流制御

上記のフリッカ補償電流指令を，*dq* 逆変換により交流の電流指令として，約 80 μs 周期で，高速な電流制御（ACR）演算を行っている。さらに，連系トランスの電圧降下分をフィードフォワードで補償することにより，ACR の追従性を改善している。高速な電流制御の実現により，フリッカ補償性能向上を図り，負荷短絡などの系統じょう乱に対しても安定した運転を実現している。

### 3.3　ハイブリッド補償

他励式 SFC と自励式 SFC のハイブリッドシステムでフリッカ補償を行う場合には，SFC 間の補償制御の非干渉化を図る必要がある。そのため，自励式 SFC では，負荷電流検出に他励式 SFC の補償電流を加算し，他励式 SFC の補償動作による無効電力の変動も合わせて補償することにより，SFC 間の補償制御の非干渉を実現している。非干渉化により，アーク炉からランダムに発生する無効電力に対して，比較的緩やかな変動分を他励式 SFC で補償し，他励式 SFC では追従できない急しゅんな変動分を自励式 SFC で補償するハイブリッドシステムを実現している。ハイブリッドシステム例として，別系統に接続した場合を**図 5** に，同一系統に接続した場合を**図 6** に示す。

## 4　フリッカ補償結果

**図 7** に，フィールドでの他励式 SFC と自励式 SFC のハイブリッドシステムのフリッカ補償結果を示す。フリッカ改善率は，他励式 SFC 単独で 57.6 %，自励式 SFC 単独で 59.4 % であり，ハイブリッド補償時の総合で 82.8 % を達成した。

## 5　あとがき

電力供給の「電気の質」に対する要求がより厳しくなってきている現在，フリッカ補償装置の役割はより重要なものとなってきている。富士電機は今後も豊富な経験と最新技術を駆使してニーズに適合した高性能なシステムを提供していく所存である。

**参考文献**

(1)　小西茂雄ほか．無効電力補償装置．富士時報．vol.74, no.5, 2001, p.289–295.
(2)　江口直也ほか．電力・産業用パワーエレクトロニクスを支える要素技術．富士時報．vol.74, no.5, 2001, p.265–272.

# 誘導加熱用高周波インバータ



倉田　巌（くらた　いわお）　　亀田　昇（かめだ　のぼる）　　三浦　敏栄（みうら　としえ）

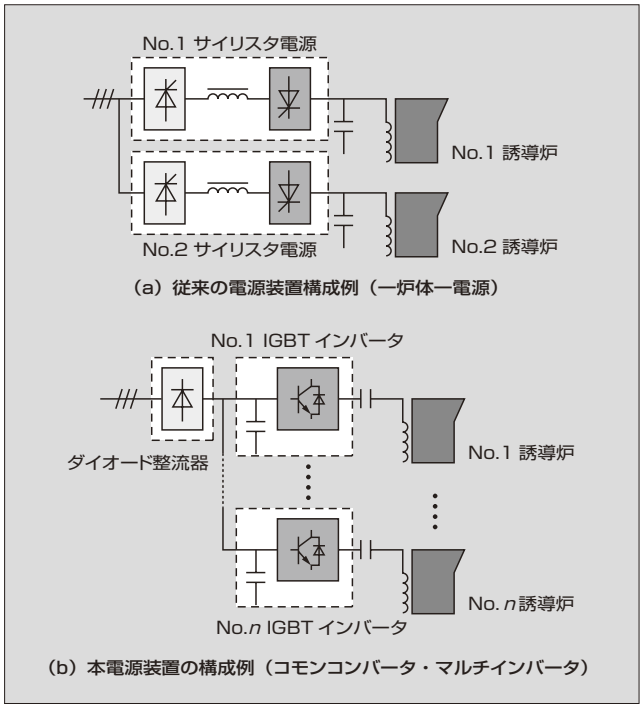
## 1　まえがき

誘導加熱とは，導電性の加熱対象物に交番磁界を印加し，渦電流を誘起させて加熱対象物を自己発熱させる加熱方法である。誘導加熱は加熱効率が高い，自動化や省力化が可能，急速加熱が可能，温度制御が容易，作業環境が改善できる，といった利点を持ち産業界で広く利用されている。

誘導加熱では加熱対象物の形状や材質，加熱条件に応じて，さまざまな周波数や電力が要求される。富士電機では誘導加熱用電源装置として，これまで各種のインバータを製品化してきた。

本稿では，最近製品化した溶解用電源装置および電縫管溶接機の特長・仕様などについて述べる。また，大口径の電縫管溶接機用に開発した大容量高周波電源装置について，その概要を述べる。

図1　複数の誘導炉への電力供給




（a）従来の電源装置構成例（一炉体一電源）

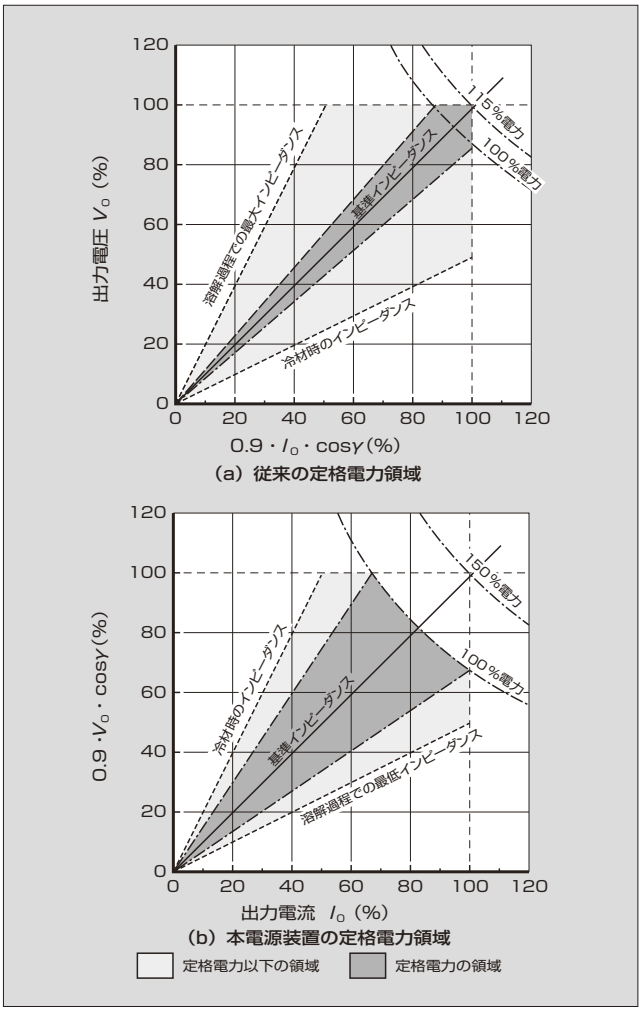
（b）本電源装置の構成例（コモンコンバータ・マルチインバータ）

## 2　誘導炉用 IGBT 電源装置

### 2.1　特　長

誘導炉とは電磁誘導現象を利用して各種金属を溶解するための電気炉である。従来は電源部にサイリスタ素子を使用した電流型インバータを用いていたが，今回，誘導炉用の中周波（500 Hz 以下）電源として，IGBT（Insulated

図2　負荷インピーダンスと定格電力




（a）従来の定格電力領域

（b）本電源装置の定格電力領域

**倉田　巌**

誘導加熱用インバータおよびその応用製品の開発・設計に従事。現在，富士電機サーモシステムズ株式会社事業推進室プラント合理化推進部。電気学会会員。

**亀田　昇**

誘導加熱装置のエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機サーモシステムズ株式会社技術部。

**三浦　敏栄**

誘導加熱用高周波インバータの開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員。

特集

Gate Bipolar Transistor）素子を使用した誘導炉用 IGBT 電源装置（以下，本電源装置という）を製品化した。すでに 1 号機を納入し，順調に稼動している。本電源装置は以下に示す特長を有している。

(1)　複数の誘導炉への柔軟な電力配分

誘導炉の操業において，2 台以上の誘導炉を一つの電源装置で運転し，かつ各誘導炉への電力配分を柔軟に行うことができれば，電源部の稼動率（ここでは一日あたりの運転時間の比率と定義）や利用率（ここでは電源装置の定格電力に対する平均運転電力の比率と定義）を向上させることができる。

従来の電流型サイリスタインバータで上記の構成とした場合，単一の電源装置では各誘導炉への柔軟な電力の分配が難しいため，**図 1**(a)のように，一つの誘導炉に一つの電源装置（順変換部 + 逆変換部）が必要となり，イニシャルコストが増大してしまうといった問題があった。

この問題を解決するため，**図 1**(b)に示すように本電源装置では IGBT 素子を用いた電圧型インバータを採用した。電圧型インバータであれば，一つの順変換部に複数の逆変換部を接続でき（コモンコンバータ・マルチインバータ），かつ各炉体への電力配分を柔軟に行うことができる。

(2)　大きな出力容量

電源装置から見た誘導炉の負荷インピーダンスは，定格状態（溶湯 100 %）に対し 1/2 ～ 2 倍程度変動する。電源装置の出力容量（出力電流×出力電圧）が小さいと，**図 2**(a)に示すように負荷インピーダンスが大きく変動した場合，定格電力を負荷に投入できる領域が狭くなる。従来は整合コンデンサを負荷の状態に応じて増減するといった方法でインピーダンス調整を行っていたが，スイッチなどの機構部品を使用するため，定期的なメンテナンスが必要であった。

図 3　入力力率の比較

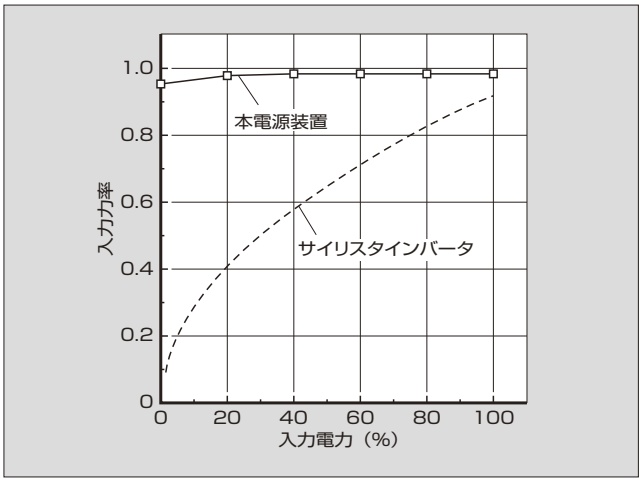
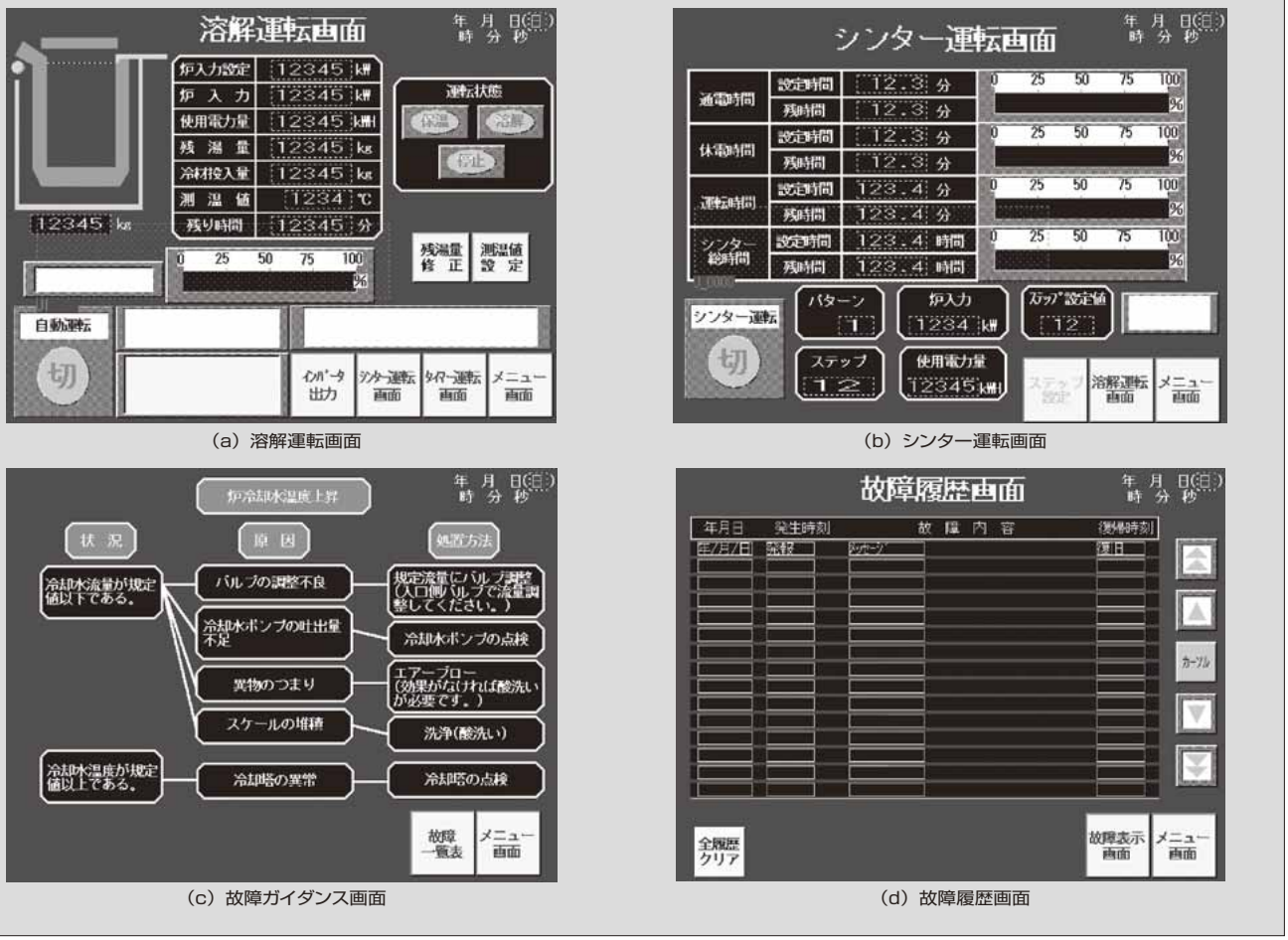



図 4　グラフィックパネルの画面例




（a）溶解運転画面　　（b）シンター運転画面

（c）故障ガイダンス画面　　（d）故障履歴画面

本電源装置では定格電力の 1.5 倍の容量を持つ逆変換部を有し，**図 2**(b)に示すように，負荷インピーダンスが広い範囲で変動しても，機構部品を用いたインピーダンス調整を行うことなく，負荷に対して定格電力を入力することが可能である。このため溶解初期から定格電力が入力可能となり，溶解時間の短縮や電力原単位の向上を図ることができる。

(3)　高い入力力率

従来のサイリスタ電源装置ではサイリスタ整流器の位相制御により電力制御を行っているため，特に低電力運転時の入力力率が**図 3** の破線で示すように低下していた。このため，特に複数の誘導炉を同時運転する場合，入力容量が増加していた。

本電源装置では順変換部をダイオード整流器と低容量平滑コンデンサで構成しており，広い出力電力範囲（20 ～ 100 %）において，入力力率は 0.98 以上を維持する。このため従来のサイリスタインバータに対して，主変圧器や入力フィルタの容量を低減できる。

(4)　入力高調波の低減

順変換部は標準で 12 パルス整流を採用している。また，オプションの 24 パルス整流を選択することで，入力部の高調波をさらに低減させることが可能である。

(5)　容易な操作体系

ユーザーインタフェースとしてグラフィックパネルを標準で採用しており，**図 4** に示すようにシンター（耐火物の形成）運転画面や溶解など，操業状況に応じた設定や運転ガイダンス，運転データなどを表示することが可能である。また，故障発生時には対処方法や故障履歴を表示することもできる。

図 5　本電源装置の回路構成例

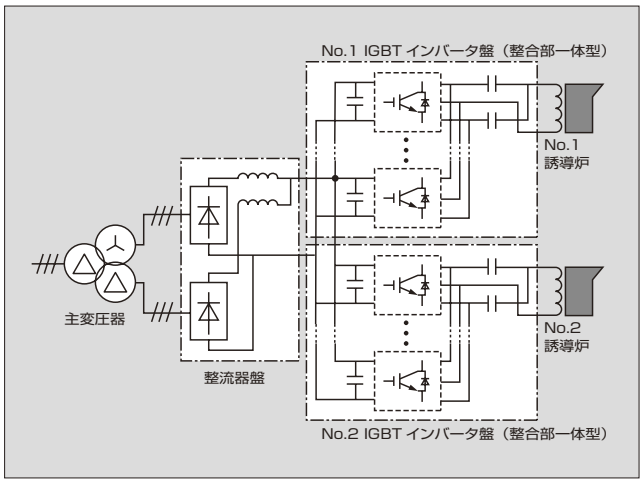



表 1　IGBTスタックの仕様

| 項　目 | 仕　様 |
|---|---|
| 型　　式 | シングルエンドプッシュプル（SEPP） |
| 使 用 素 子 | IGBT |
| 出 力 電 圧 | 200～300 V（方形波） |
| 出 力 電 流 | 4,500 A（正弦波） |
| 出 力 電 力 | 750 kW |
| 出力周波数 | 50～500 Hz |
| 冷 却 水 量 | 30 L/min |
| 質　　量 | 60 kg |

### 2. 2　回路構成と制御方式

**図 5** に本電源装置の回路構成例を示す。順変換部は 6 相ダイオード整流器を 2 台並列接続し，12 相整流とすることで入力側の高調波を低減している。逆変換部は IGBT モジュールを使用したシングルエンドプッシュプル形式で構成されている。これは誘導炉の負荷インピーダンスに合わせ低電圧・大電流を出力するためである。IGBT スタックの仕様を**表 1** に，外観を**図 6** に示す。大電流出力が可能な逆変換部を採用することにより，整合部は整合コンデンサのみで構成可能となり，マッチングトランスなどがなくとも，負荷とのマッチングが可能となっている。また大容量機の場合，IGBT スタックを複数台並列接続することで対応が可能である。**図 7** に 2,250 kW 電源盤の外観を示す。

制御方式は出力電流が出力電圧に対して常に遅れ位相で

図 6　IGBT スタックの外観

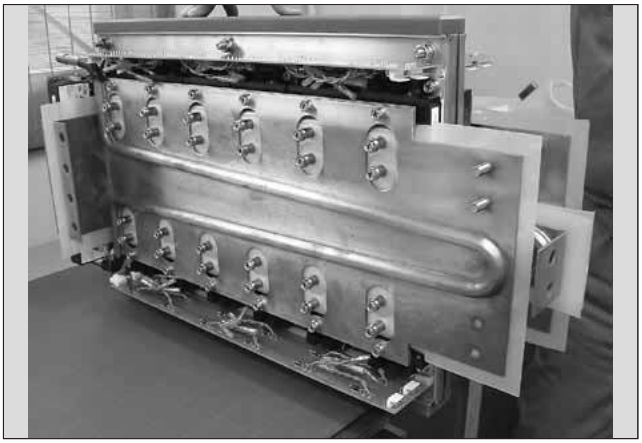
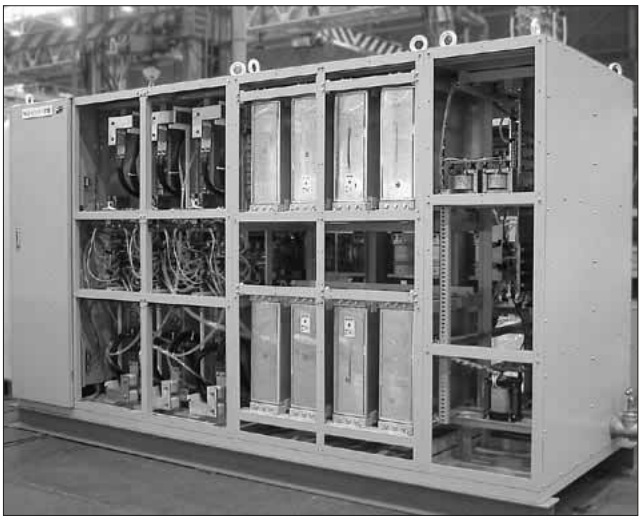


図 7　2,250 kW 500 Hz 電源盤の外観（制御部 + インバータ部 + 整合部）



運転される γ 角制御（位相差制御）方式を採用している。この制御方式はインバータ部のみで電力制御ができるため，直流中間部での電圧コントロールが不要となり，負荷急変に対する応答速度が向上するといった特長を有している。制御対象は入力電力（出力電流制限付き）または出力電流である。また，炉体保護のため炉体電圧に対する制限回路を設けており，炉内のあらゆる負荷条件においても誘導炉を安定かつ安全に運転することが可能となっている。

### 2.3　標準系列と仕様

標準系列と仕様を**表 2** に示す。出力周波数は 50 ～ 500 Hz，出力電力は 750 ～ 6,000 kW を標準化している。

### 2.4　IGBT 電源装置の今後

今後はスイッチング周波数の高周波化を進め，アニーラなどの各種加熱用電源装置としても適用していく予定である。また，入力高調波をさらに低減した電源装置についても開発を行っていく予定である。

## 3　電縫管溶接機用電源装置

### 3.1　特　長

電縫管とは帯状の金属板から製造されたパイプであり，その製造には高周波（数百 kHz）の電源が必要である（**図 8**）。富士電機では約 10 年前に半導体（MOSFET：Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）を用いた誘導式の電縫管溶接機を製品化したが，今回，新しい整合装置を組み合わせた溶接機を製品化した。すでに 20 台が稼動中である。新しい溶接機は従来の半導体式溶接機の持つ特長に加え，以下の特長を有している。

表 2　標準系列と仕様

| 項　目 | 仕　様 | |
|---|---|---|
| 入　　力 | 三相　300～440 V　±5％<br>周波数：50/60 Hz | |
| 出　　力 | 電力（kW） | 電流（A） |
| | 750 | 4,500 |
| | 1,100 | 6,750 |
| | 1,500 | 9,000 |
| | 1,800 | 11,250 |
| | 2,250 | 13,500 |
| | 3,000 | 18,000 |
| | 3,750 | 22,500 |
| | 4,500 | 27,000 |
| | 5,250 | 31,500 |
| | 6,000 | 36,000 |
| 出力周波数 | 50～500 Hz | |
| 出力調整範囲 | 5～100％ | |
| 制御対象 | 入力電力（出力電流および炉体電圧制限付き）または出力電流（炉体電圧制限付き） | |
| 主回路形式 | シングルエンドプッシュプル | |
| 変換効率 | 97％（整合部含む） | |
| 冷却方式 | 水冷式（純水循環）冷却水温：5～38℃ | |

(1)　自動マッチング機能

電縫管の製造ラインでは，通常，1 台の溶接機でさまざまな直径や板厚のパイプを製造している。しかしながらパイプの種類が異なると溶接機から見た負荷インピーダンスが変化するため，場合によっては必要な電力をパイプに入力できない状態になる。これを避けるためには，負荷とのマッチング状態を調整して，常に最適なマッチング状態で溶接を行う必要がある。従来は整合部のマッチングトランスのタップ調節や整合コンデンサの増減によりマッチングの調整を行っていたが，このような方法は段階的な調整しかできず，最適なマッチング状態に調整できない場合があった。

この問題を解決するため，後述する直列共振と並列共振を組み合わせた独自の整合回路と，連続でマッチング調整を行う調整機構を開発した。また，溶接中のマッチング状態を常に監視して最適状態に保つ自動マッチング機能も開発し，オペレーターの負担を軽減している。

(2)　小型・高効率

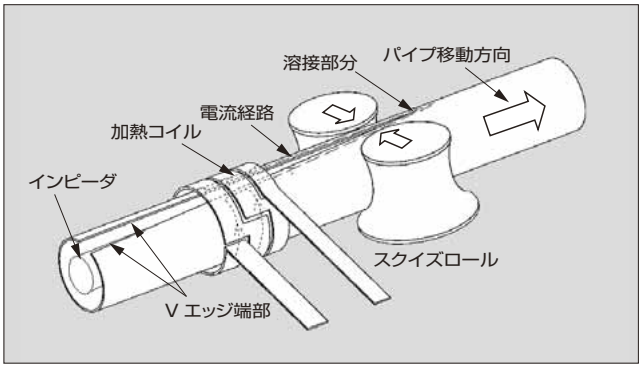
従来の電縫管溶接機用電源装置には，真空管発振器が使用されてきたが，近年では設備の老朽化が進み，半導体式に置き換えられてきている。その際，問題となるのが設置スペースの確保である。溶接部近傍はさまざまな機器（ビートカッタやセンサ類）が配置されているため，置き換えられる整合部も，従来使用されていた空心のカレントトランス（空心 CT）並みの小型化が要求される。

今回製品化した溶接機では整合コンデンサ盤を空心 CT とほぼ同一容積まで小型化しており，リプレイスを容易に行える。また，効率を低下させる空心 CT を用いないため整合部の効率も向上している。溶接機の入力電力に対するパイプへの入力電力（ワークコイル以降の電力）の割合（効率）は約 83％ を達成している。

(3)　操作性の向上

オペレーターとのインタフェースにはグラフィックパネルを採用しており，運転データ，運転記録，故障内容，故障履歴などを表示し，運転状況の確認を容易に行うことができる。また自動負荷調整機能により，常に最適な負荷条件での運転が可能である。さらにはあらかじめ各パイプ

図 8　電縫管の溶接原理



サイズにおけるライン速度および電力の運転データをグラフィックパネルで記録し，造管における板の中継ぎ時などのライン速度が傾斜的に変化する際に，ライン速度の変化に応じて溶接電力を制御する速度追従制御機能を開発した。実際のラインで現在良好に稼動中である。実際の速度追従制御画面を**図 9** に示す。

### 3. 2　回路構成

新型電縫管溶接機の回路構成を**図10**に示す。整合回路は負荷調整器（リアクトル）を直列，整合コンデンサとワークコイルを並列に接続し，直列・並列共振回路を構成している。ワークコイルのインダクタンスを$L_2$，負荷調整器のインダクタンスを$L_1$とおくと，ワークコイルの電流$I_c$は式(1)で示される。式(1)から$I_c$は，ほぼ$L_1$と$L_2$の比にインバータの出力電流$I_o$を乗じた値となる。

$$I_c = L_1/L_2 \times I_o \text{（ただし，} L_1 > L_2\text{）} \cdots\cdots (1)$$

図 9　速度追従制御画面

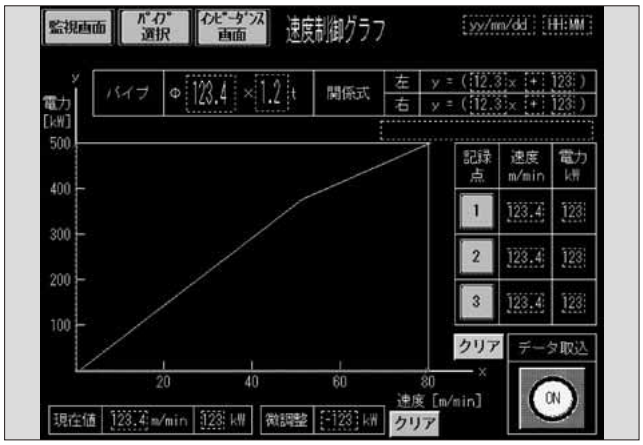
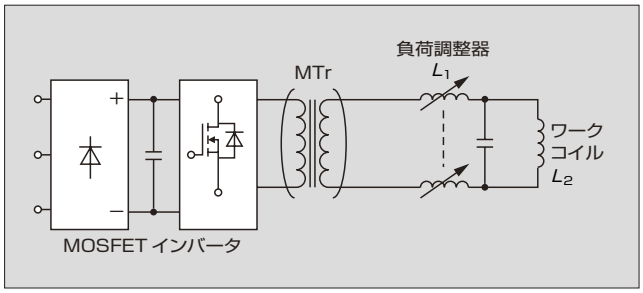



図 10　新型電縫管溶接機の回路構成




よって負荷調整器のインダクタンス$L_1$を変化させることでワークコイルの電流が変化するため，結果として負荷に対してマッチング調整を行うことができる。新型電縫管溶接機の外観を**図11**に示す。

### 3. 3　溶接能力の比較

電縫管溶接では溶接能力を比較する指標として次式で示される係数$k$（ヒート係数）を用いる。$k$値が低いほど溶接能力が高いことを表している。

$$k = P_{in}/(L_s \times t)$$

$P_{in}$：溶接機への入力電力

$L_s$：ライン速度（m/min）

$t$：パイプの板厚（mm）

実際の操業データから$k$値を求めたものを**表 3** に示す。パイプの種類によってばらつきはあるが，新型半導体式溶接機は真空管発振式溶接機に対して，溶接能力が約 20 ～ 30 % 高いという結果となっている。

### 3. 4　標準系列と仕様

**表 4** に電縫管溶接機の標準仕様を示す。出力周波数は 200 ～ 450 kHz，入力電力は 50 ～ 500 kW を標準化している。また，標準外の仕様についても，柔軟に対応することが可能である。

### 3. 5　電縫管溶接機の今後

これまでは，誘導方式で 500 kW までの溶接機を提供してきたが，顧客からは大口径管の溶接にも対応可能な，より大容量の溶接機を求められている。また，板材に高周波

図 11　新型電縫管溶接機（400 kW 400 kHz）の外観

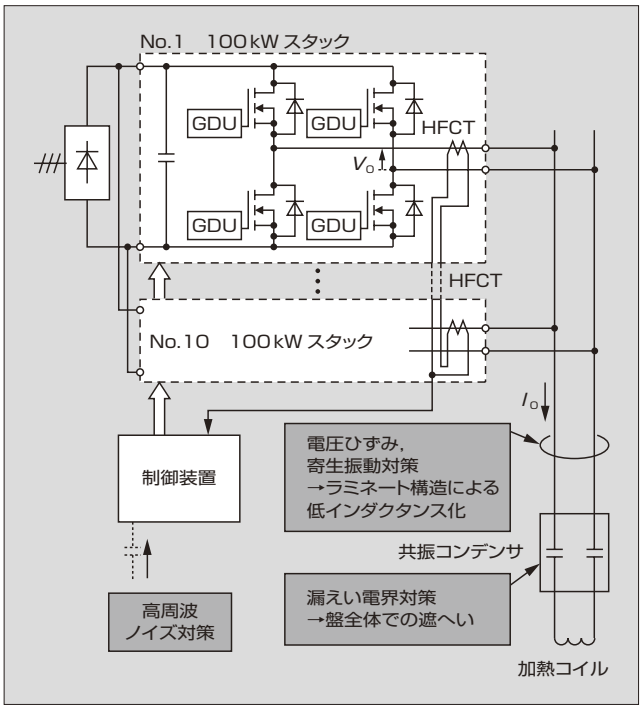
表 3　真空管発振式溶接機と富士電機の新型半導体式溶接機の溶接能力比較

| パイプサイズ | | 真空管発振式溶接機 | | | 新型半導体式溶接機 | | | 能力差 $(1-K_{(SS)}/K_{(VT)})\times 100$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 管径 (mm) | 板厚 (mm) | ライン速度 $L_s$ (m/min) | 入力電力 $P_{in}$ (kW) | 溶接能力 $k_{(VT)}$ | ライン速度 $L_s$ (m/min) | 入力電力 $P_{in}$ (kW) | 溶接能力 $k_{(SS)}$ | |
| 48.6 | 2.4 | 117 | 266 | 0.95 | 117.3 | 194 | 0.69 | 27 |
| 76.3 | 2.3 | 63 | 231 | 1.59 | 63.2 | 157 | 1.08 | 32 |
| 114.3 | 2.8 | 35 | 212 | 2.16 | 32.4 | 151 | 1.66 | 23 |
| 126 | 2.3 | 45 | 218 | 2.11 | 50 | 184 | 1.60 | 24 |
| | 3.2 | 37 | 225 | 1.90 | 40.3 | 197 | 1.53 | 20 |

表 4　電縫管溶接機の標準仕様

| 項　目 | | 仕　様 |
|---|---|---|
| 入　力<br>（非接地電源） | 電　　圧 | 6パルス整流：三相　210V　±5%<br>12パルス整流（オプション）：<br>三相　105V×2　±5% |
| | 周 波 数 | 50/60Hz　±2% |
| | 電　　力 | 50，100，200，300，400，<br>500（kW） |
| 出　力 | 周 波 数 | 200～450kHz |
| 制　御 | 制御対象 | 入力電力（出力電流制限付き）または出力電流 |
| | 制御範囲 | 入力電力制御：定格の10～100%<br>出力電流制御：定格の10～100% |
| 冷　却 | 冷却方式 | 水冷式 |
| | 冷 却 水 | 純水（水温：5～38℃） |
| 塗装色 | | マンセル5Y7/1 |

図 12　1,000kW 500kHz 高周波電源装置の構成




電流を直接供給して溶接を行うコンタクト方式の溶接機についても対応を求められている。以下にこれらの用途向けに開発した大容量 1,000 kW 500 kHz 高周波電源について，その概要を述べる

(1)　スタック並列化

**図 12** に 1,000 kW 500 kHz 高周波電源装置の構成を，**図 13** に出力電圧・電流波形例を示す。今回，100 kW スタックの 10 並列化が可能な電流検出器を兼ねる電流バランサ（HFCT：High Frequency Current Transformer）の水冷強化などにより，小型・大容量化を行った。これにより，富士電機の実績のある 100 kW スタックおよび並列技術を用いて，1,000 kW 出力を得ることができる。

(2)　電圧ひずみ，寄生振動対策

高周波・大電流では，数 nH のインダクタンスでもその電圧降下が大きく，電圧ひずみが無視できなくなり，機器へ悪影響を及ぼす場合がある。このひずみの低減や浮遊静電容量との寄生振動の抑制のため，往復導体をラミネートし，出力導体の低インダクタンス化などを行っている。

(3)　高周波ノイズ対策

盤全体を遮へいすることにより，大電流によって生じる外部への漏えい電界抑制や浮遊静電容量などを介して入り込む制御装置への高周波ノイズ対策を行っている。

**表 5** に加熱用大容量高周波電源装置の仕様を示す。

図 13　1,000 kW 500 kHz 高周波電源装置の出力電圧・電流波形例

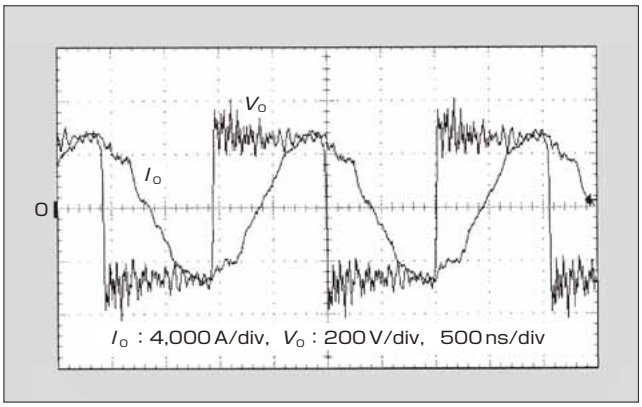



表 5　加熱用大容量高周波電源装置の仕様

| 項　目 | 仕　様 | |
|---|---|---|
| 入　　力 | 三相　210V　±5%　周波数：50/60Hz | |
| 出　　力 | 電力（kW） | 出力電流（A） |
| | 1,000 | 4,600 |
| 出力周波数 | 200～500kHz | |
| 出力調整範囲 | 10～100% | |
| 制御対象 | 入力電力（出力電流制限付き）または出力電流 | |
| 主回路形式 | フルブリッジ | |
| 冷却方式 | 水冷式（純水循環）　冷却水温：5～38℃ | |

## 4　あとがき

誘導炉用の溶解電源装置と電縫管溶接機用電源装置について，その特長，仕様，回路構成などを紹介した。今後も顧客のニーズに合った加熱用電源装置の製品化を進めていく所存である。

### 参考文献

(1)　倉田巖，中村清和．誘導加熱用サイリスタインバータと最近の適用事例．富士時報．vol.74, no.5, 2001, p.306–310.
(2)　倉田巖，中村清和．最近の電縫管溶接装置．富士時報．vol.71, no.5, 1998, p.285–287.
(3)　倉田巖，中村清和．電縫管と溶接装置．配管技術．1999–2.
(4)　三浦敏栄，中村清和．MOSFET インバータ型高周波電源．富士時報．vol.74, no.5, 2001, p.311–315.

# 400 V 系高効率オンライン UPS「7000D シリーズ」



福田　幸夫（ふくだ　さちお）　　日永田　守（ひえだ　まもる）　　幸林　久詩（こうばやし　ひさし）

## 1　まえがき

近年，IT の発展とともに，コンピュータシステムの高度な情報統合，ネットワーク化が進展している。さらにシステムの効率化に加え，システムの安全性がより重要度を増してきている。こうした背景から，電源設備に対しても「高効率・高信頼性」の要求が高まっている。

また，IDC（Internet Data Center）を含めたビル市場では設備投資軽減や省スペース化の観点から，従来の 200 V 系から 400 V 系の配電システムが主流になりつつある。これらの市場ニーズに応える高効率・高信頼性・省スペース化を実現した 400 V 系高効率オンライン無停電電源装置（UPS）「7000D シリーズ」を製品化した。

本稿では，その特長および仕様を紹介する。

## 2　特　長

### 2.1　高効率

信頼性の高い常時インバータ給電方式でありながら，最大装置効率 95％以上を実現した。また，装置そのものが省電力であることにより，UPS の発生損失による発熱を処理する空調消費電力費の削減効果も大きい。**表 1** に 7000D シリーズ（500 kVA）における高効率化による電気料金および二酸化炭素（$CO_2$）排出量の比較例を示す。本計算例では UPS の総合効率が 3 ポイント上がると 500 kVA あたり年間約 244 万円の節約，$CO_2$ 排出量では 60.4 t の削減が可能となることを示している。さらに，二次的効果として冷却ファンの責務低減による交換保守コストの低減，盤内部品の温度責務低減による高信頼化が期待できる。このように高効率化はトータルランニングコストの低減をもたらすため，本 UPS のユーザーメリットは大変大きいと考えられる。

表 1　UPS（500 kVA）における高効率化による電気料金および$CO_2$排出量の比較例

| UPSの容量 | 500 kVA（450 kW） | | 備　考 |
|---|---|---|---|
| UPSの種類 | 当社現行 UPS | UPS7000D シリーズ | |
| 総　合　効　率 | 92.5％ | 95.5％ | |
| 発　生　損　失 | 36.5 kW | 21.2 kW | |
| 空調機消費電力 | 10.3 kW | 7.0 kW | |
| UPS　損　失　差 | 15.3 kW | | =36.5−21.2（kW） |
| 空調消費電力差 | 3.3 kW | | =10.3−7.0（kW） |
| 年　間　電　力　量 | 162,936 kWh | | =（15.3+3.3）kW×24時間×365日 |
| 年間節約電気料金 | 244万円 | | 電気料金：15円/kWh |
| 年間 $CO_2$ 削減量 | 60.4 t | | 排出原単位：0.371 kg/kWh |

### 2.2　入出力電圧 400 V 系専用設計

近年，500 kVA 以上の UPS は入出力電圧 400 V 系の要求仕様が増えてきている。一方，現行の UPS6000D3 シリーズは電力交換器が入出力 200 V 設計であるので，400 V 系に対応するためにトランスを用いていた。7000D シリーズでは電力変換器を入出力 400 V 系の専用設計とし，トランスレスを実現し，装置全体の質量，体積，発生損失を低減することが可能となった。**図 1**，**図 2** に現行 UPS と新型 UPS の「負荷率と効率」および「機能別発生損失比較」を示す。

### 2.3　小型・軽量・省スペース

現行同容量 UPS に比べ，約 30％の小型化を実現した。さらに UPS 回路とバイパス回路を別盤に実装したことで，一括母線並列システムではさらに 20％の小型化を実現した。

### 2.4　ユーザーフレンドリーな操作・表示機能

表示パネルにはタッチパネル機能付カラー液晶画面を採用し，操作性と視認性の両方を飛躍的に向上させた。**図 3** に起動時の操作表示画面例を示す。このように装置の動作状態，計測表示，操作ガイダンスを同時表示させ，さらにリアルタイムに操作手順を表示することで誤操作を未然に防ぎ，より分かりやすい操作ガイダンスを実現している。

**福田　幸夫**

中大容量 UPS の開発・設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社生産本部神戸工場設計部。

**日永田　守**

中大容量 UPS の開発・設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部パワエレ開発センター開発設計部。

**幸林　久詩**

中大容量 UPS の開発・設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部パワエレ開発センター開発設計部。電気学会会員。

特集

図 1　UPS の負荷率と効率の比較

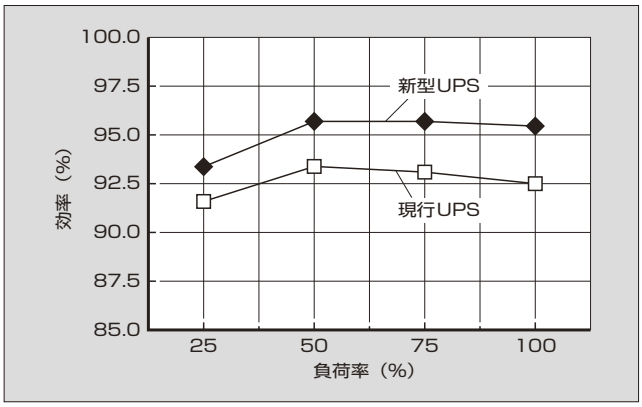



図 2　UPS の機能別発生損失の比較

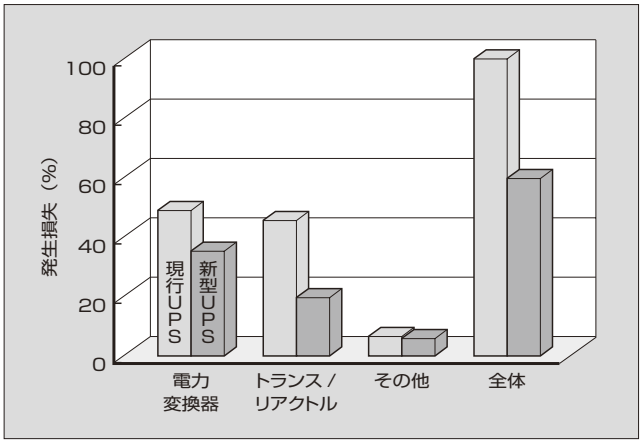



図 3　操作表示画面例（操作ガイダンス表示）

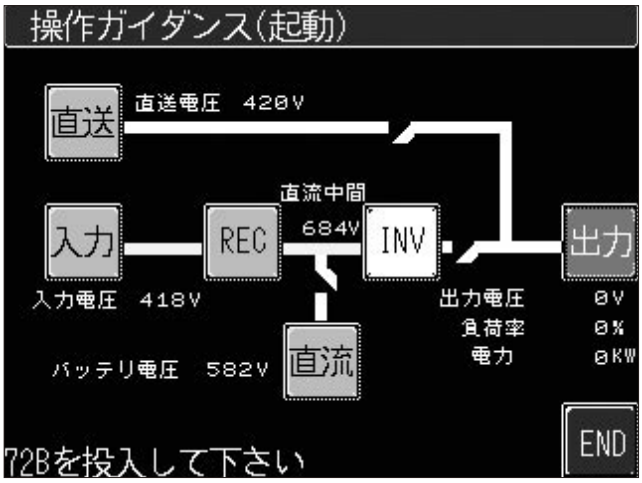
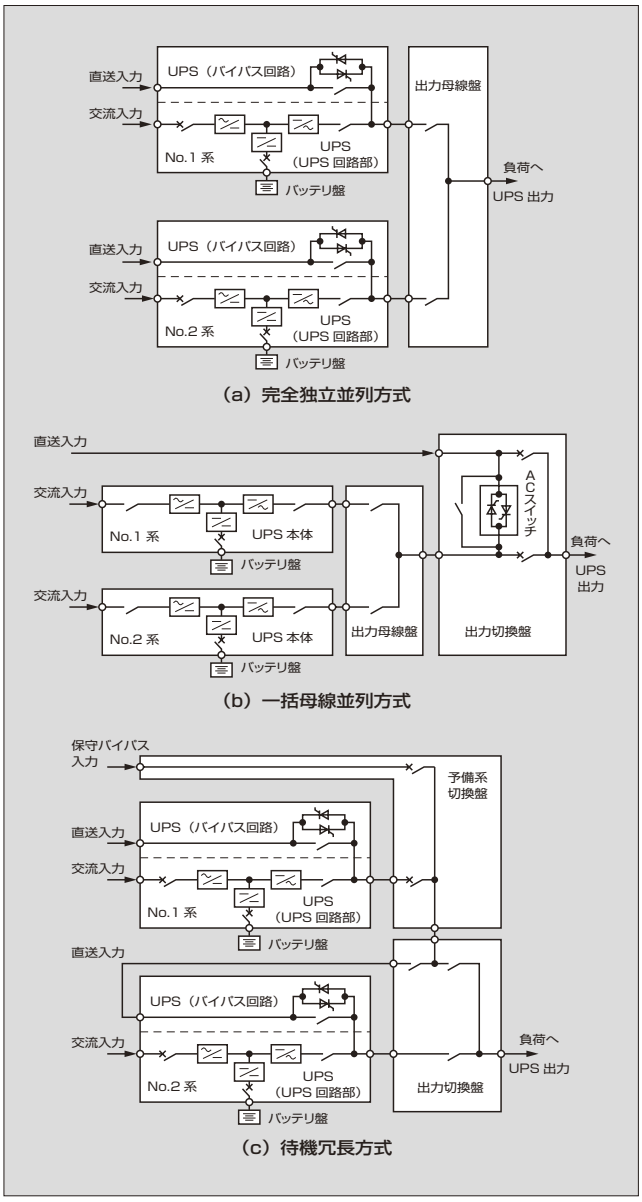



図 4　並列・待機冗長システム




### 2.5　高信頼性システム対応

高信頼性システムとして並列冗長システム（完全独立，一括母線），待機冗長システムなどがある。**図 4** にシステム例を示す。一例として完全独立並列システムのメリットは UPS 給電状態で他の UPS のメンテナンスや計画性のある増設が可能である。これらのシステムをニーズに合わせた最適な高信頼性システムとして実現可能である。

### 2.6　高過負荷耐量

最近の負荷機器は省電力化が進み，定常動作時や待機時の電力を低減している。一方，装置の突入電流や起動電流は，従来と変化していない場合が多く，定常負荷電力で UPS 容量を選定した場合に，一過性の過負荷を検出している事例が増えている。本 UPS は，従来からあった 150％：1 分間，125％：10 分間に加え，200％：2 秒間の短時間過負荷耐量を備えることで，経済的な容量選定を可能としている。

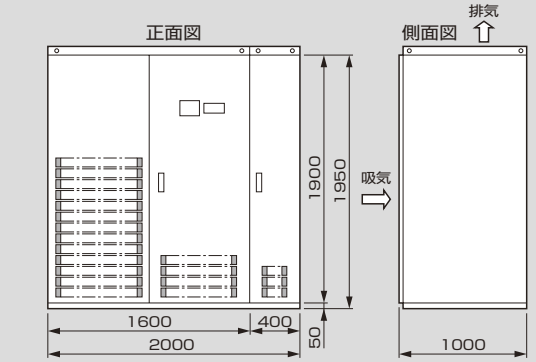
### 2.7　ショックレス

入力系統に対して過渡的な変動の影響を与えないショックレスな動作を実現させるため，次の制御を用いている。

(1)　整流器運転時には系統電源に対して過渡的な変動を抑制するために，交流入力電流を緩変させ徐々に取得電力

図 5　UPS7000D シリーズ 500 kVA 機の外観

図 6　UPS7000D シリーズの寸法・質量




| 容量 (kVA) | システム仕様 | 幅：W(mm) | 奥行：D(mm) | 高さ：H(mm) | 質量 (kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| 500 | 単機方式<br>完全独立並列方式<br>待機冗長方式 | 2,000 | 1,000 | 1,950 | 2,500 |
| 500 | 一括母線並列方式 | 1,600 | 1,000 | 1,950 | 2,250 |

を増加させる制御（パワーウォークイン）

(2)　インバータ起動時には負荷側に接続されているトランスなどへの突入電流を抑制させる制御（ソフトスタート）

(3)　手動切換時にはインバータと直送の間で負荷電流を徐々に受け渡す制御（負荷移動）

## 3　仕　様

**図 5** に UPS7000D シリーズ 500 kVA 機の外観を示す。**図 6** に寸法・質量を示す。回路をトランスレスとしたことで小型・軽量を実現している。

表 2　UPS7000Dシリーズの性能と仕様

| 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 | | 500kVA |
| 装置最大効率 | | 95％ |
| 停電時切換時間 | | 無瞬断（JEC2433　クラス1準拠） |
| 交流入力 | 相　数 | 三相3線 |
| | 電　圧 | 415/420V±10％ |
| | 周波数 | 50/60Hz±5％ |
| | 力　率 | 0.98以上（定格時） |
| | 電流高調波ひずみ率 | 5％以下（定格時） |
| 直送入力 | 相　数 | 三相3線 |
| | 電　圧 | 交流出力電圧に同じ |
| 直流入力 | 公称電圧 | 528V（鉛蓄電池264セル相当） |
| 交流出力 | 相　数 | 三相3線 |
| | 電　圧 | 415/420V |
| | 周波数 | 50/60Hz |
| | 負荷力率 | 0.7（遅れ）～1.0（定格0.9） |
| | 電圧精度（整定時） | ±1.0％以内 |
| | 過渡電圧変動 | ±5％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）<br>5％以下（整流器負荷） |
| | 周波数精度 | ±0.01％以内（内部発振時） |
| | 外部同期範囲 | ±1.0％，±2.0％（出荷時設定） |
| | 過負荷耐量 | 通常時：125％　10分間，<br>150％　1分間，200％　2秒間 |

**表 2** に UPS7000D シリーズの性能と仕様を示す。

## 4　構　成

### 4.1　制御装置の構成

制御装置には，PWM（Pulse Width Modulation）波形の制御演算を行う CPU（Central Processing Unit）とシーケンス制御を管理する CPU，および通信や RAS（Reliability，Availability，Serviceability）管理などのマンマシン機能を行う CPU で構成し，機能分離型のマルチプロセッサ方式を用いている。それにより，それぞれの用途でパフォーマンスを向上させ，動作的に安定した制御システムを実現させている。また，FPGA（Field Programmable Gate Array）にて，それぞれの CPU に対しての割込みタイミングの生成や CPU の異常を検出することによりシステムの信頼性を向上させている。

### 4.2　主回路構成と動作の概要

**図 7** に主回路ブロック図を示す。システム構成は交流を直流に変換する整流器部と直流を交流に変換するインバータ部から成るダブルコンバージョン方式で，さらに直流部には蓄電池の充放電制御を行うチョッパ部が接続される。交流入力電圧が正常範囲にある通常運転状態では，イン

図 7　主回路ブロック図

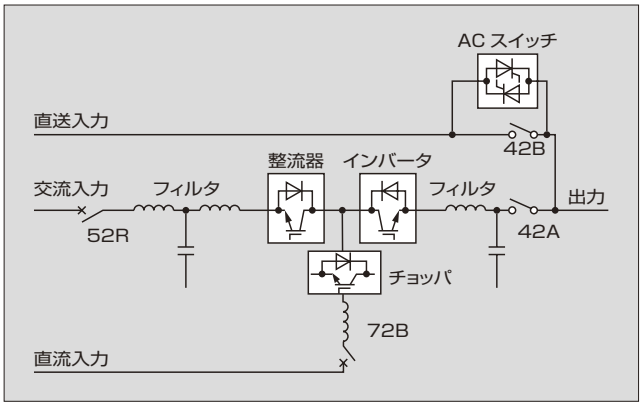
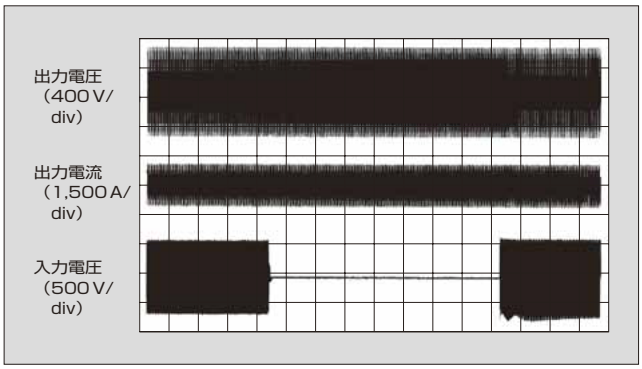



図 8　停電・復電波形データ（500 ms/div）




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る。このとき，整流器は UPS の交流入力電流が力率 ≒ 1 の正弦波となるように制御を行い，チョッパ部は蓄電池の充電を行う。交流入力に停電が発生すると，チョッパ部は蓄電池の放電によって得られる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負荷に電力を供給する。**図 8** に停電・復電時の波形データを示す。

## 5　要素技術

### 5.1　チョッパ回路の適用

従来の UPS では，直流中間電圧に蓄電池を直接接続する構成が多かったが，本 UPS は 400 V 系出力のため，直流電圧が従来よりも高くなる。そのため直接蓄電池を接続すると蓄電池の直列数が多くなり，蓄電池の遮断器や保護回路などに制約条件が増えてしまう。そこで，この UPS では蓄電池と直流中間電圧の間に双方向チョッパ回路を設け，通常運転時は蓄電池を定電圧・定電流充電にて制御し，停電時は直流中間電圧を定電圧にて制御を行う。

この方式の利点として下記があげられる。

(1)　蓄電池電圧を低く抑えることで保護回路を含めた蓄電池設備の構成を容易にできる。

(2)　通常運転中の直流中間電圧を最小限に低くできるため変換器の損失を低減できる。

(3)　チョッパ回路に過電流保護機能を付加することで，蓄電池回路に異常が生じた場合でも負荷に対する影響を少なくできる。

### 5.2　高効率スイッチング制御

瞬間的な制御応答（瞬時値制御特性）は従来の性能を維持しながら，従来に比べ約 20 % のスイッチング損失を低減させた新制御方式を実現した。

### 5.3　瞬時制御技術

インバータ制御において波形予測瞬時値制御に加え，瞬時横流制御を行うことにより並列システムや待機冗長システムなど，インバータ同士がラップして運転するシステムでの横流を高速に制御し，安定した高品質の電圧を供給することを実現した。

### 5.4　シミュレーション技術の適用

7000D シリーズの冷却設計と導体設計においては，最新のシミュレーション技術を適用した。冷却設計では，電力変換器部に使用している半導体を冷却する放熱フィンの熱伝導シミュレーションと，冷却ファンによる強制空冷の流体シミュレーションを組み合わせ，装置全体の冷却設計の最適化を図った。また，この装置では半導体電力変換素子として IGBT モジュールを多並列接続で使用している。並列モジュールの電流分担を均一化することが変換器設計の品質・性能上で非常に重要である。また，電流分布を決定する重要な要素である導体設計において，導体の抵抗とインダクタンスをシミュレーションによって求め，最適化を図った。

### 5.5　最新 IGBT の適用

この UPS の電力変換器に使用した半導体素子は，富士電機の最新 IGBT である U シリーズ（1,200 V/450 A）である。

この素子の特長は，高耐圧・低損失であることと，特性のばらつきが少なく並列使用が従来よりも容易であることである。この素子の適用が，最大装置効率 95 % 以上と装置の小型化 30 % の達成，および多並列接続による高耐圧・大電流電力変換器の実現に大きく貢献している。

## 6　あとがき

常時インバータ方式を用いた高効率 UPS7000D シリーズを紹介した。この製品は最大装置効率 95 % 以上の高効率と並列機能を有した高信頼性を要求する IDC などの情報化ビル市場をターゲットにした製品であるが，高効率を求めるユーザーにも広く適応できる製品である。

今後も新技術を取り入れ，顧客ニーズに応える電源装置を開発・製品化していく所存である。

### 参考文献

(1)　廣瀬順ほか．大容量 UPS「UPS8000 シリーズ」．富士時報．vol.77, no.6, 2004, p.458–462.

# 高効率オンラインミニ UPS「GX200 シリーズ」



松尾　浩之（まつお　ひろゆき）　　大島　雅文（おおしま　まさふみ）　　石井　紀好（いしい　のりよし）

## 1　まえがき

近年，コンピュータシステムが急速に進展する高度情報化社会において，システムの安定稼動に対する高信頼性の要求がますます高くなってきている。また最近は，半導体製造工場といった情報通信機器以外の負荷設備も電力の安定供給の要求が高まっている。そのため，電源障害（電圧低下や瞬断など）によるシステムの誤動作・停止に対応するために無停電電源装置（UPS）を設置して保護する需要が高まっている。

また，コンピュータまたはサーバの高性能化に伴う消費電力の増加による装置の大容量化や高密度実装による熱処理の問題，地球環境問題への意識の高まりから，UPS の大容量化・高効率化および小型化・省スペース化の要求も高まっている。

このような背景のもと，富士電機では，先に交流チョッパ技術を展開した直並列技術に基づく新しい変換方式「デュアルコンバージョン方式」を採用したミニ UPS「GX100/GX200 シリーズ」を製品化している。この UPS は交流電源電圧の過不足を補償しながら，負荷に安定した電力を供給する方式である。今回，その容量系列拡大として高効率オンラインミニ UPS「GX200 シリーズ」（5 ～ 10 kVA）を開発，製品化した。

本稿では，GX200 シリーズの特長と製品仕様，回路動作について紹介する。

## 2　GX200 シリーズの特長

GX200 シリーズは，常時インバータ方式とラインインタラクティブ方式の特長を兼ね備えており，以下に述べる特長がある。

### 2.1　小型・省スペース

**図 1** に GX200 シリーズの外観を示す。同図は 5 kVA タイプである。この UPS はサーバとの融合を前提に設計されており，自立型および 19 インチラックに搭載可能なラック型，どちらにでも対応できる。また，サーバの周辺機器として違和感のない外観デザインとしている。一方，従来機種（J シリーズ）と比較して，体積比で 43 %，質量比で 63 % の小型化・軽量化を実現している（5 kVA）。その結果，19 インチラックに搭載する場合は，5 kVA では占有スペース 3 U（1 U ≒ 44.5 mm），7.5/10 kVA では 6 U で搭載することができ，ラック搭載時の省スペース化を実現している。

### 2.2　高性能・高機能

GX200 シリーズは，通常運転時において IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を用いたスイッチング周波数約 16 kHz の高周波 PWM（Pulse Width Modulation）制御により，電源変動を抑制しながら低ひずみ率の正弦波電圧を負荷に供給する。**図 2**(a)，(b)は，入力電源電圧が低下しているとき，すなわち昇圧運転時の入力波形の一例である。出力電圧波形のひずみ率は抵抗負荷時で 4 %，整流負荷時で 6 % と良好な波形が得られている。入力電流は高力率制御方式を採用しているため，負荷機器から発生する無効電流や高調波電流の流出を抑制している。また，常時インバータ方式と同様，**図 3** に示すように停電復電動作は無瞬断切換を実現している。さらに，瞬時波形制御の効果により，過渡変動時においても高速応答を実現し，**図 4** の

図 1　GX200 シリーズの外観

**松尾　浩之**

UPS の製品開発，設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部パワエレ開発センター開発設計部課長補佐。

**大島　雅文**

UPS の製品開発，設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部パワエレ開発センター開発設計部。

**石井　紀好**

UPS の製品開発，設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部パワエレ開発センター開発設計部。

入力電圧急変，**図 5** の負荷急変においても安定した出力電圧波形を供給している。

一方，入力電源異常時に UPS が正常に働くように，毎起動時および一定時間ごとにバッテリーの状態を確認する機能を装備している。この機能により事前にバッテリーの状態を把握することが可能となる。さらに，入力電圧異常やバッテリー電圧低下などの各種警報出力も備えている。

### 2. 3　高効率

デュアルコンバージョン方式は，入力電源電圧をベースとして，出力電圧の過不足分だけを補償する方式である。そのため，高性能と高機能を維持したままでの高効率化が可能となっている。GX200 シリーズの変換効率は非常に高く，各容量とも 95 % と従来のインバータ方式に比べて 8 ～ 9 ポイント改善されている。

図 2　入出力波形

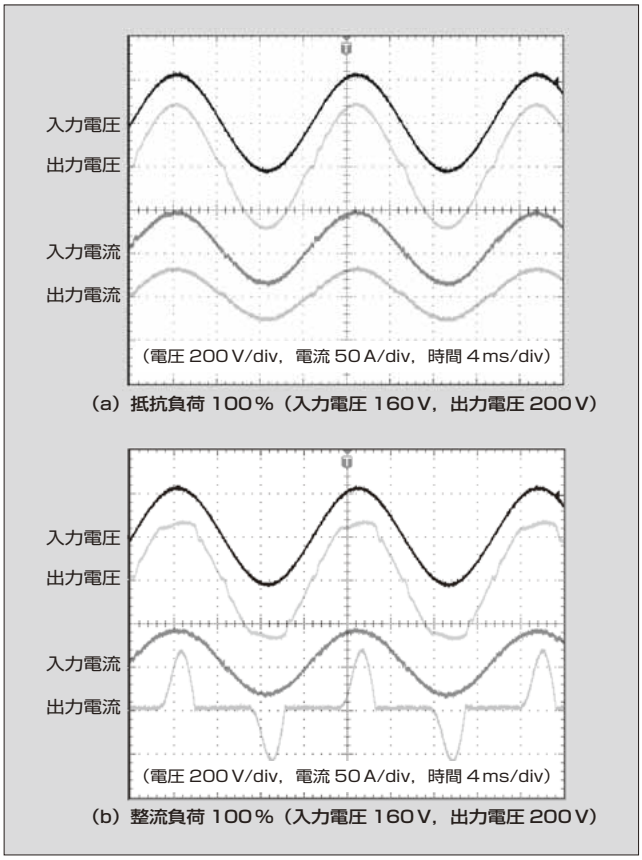
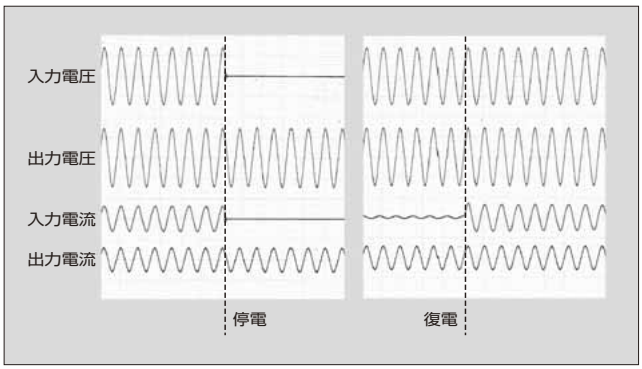



図 3　停電復電切換波形




### 2. 4　容易なメンテナンスと豊富なインタフェース

バッテリー交換は，UPS 出力を停止させることなく，システムを稼動した状態で，前面から安全に行うことが可能である。

外部との通信インタフェースとして，従来機種（J シリーズ）と同等である D-SUB9 pin を用いた標準インタフェースと接点信号インタフェースが用意されている。このボードは，異常情報出力や UPS 自動シャットダウン信号，RS-232C シリアル通信などに対応している。UPS 管理ソフトウェア「NetpowerView F」との組合せによって，より多くの情報を提供するとともに，電源トラブルに対する UPS 動作の対応をより高度に設定することが可能となる。さらに，Web/SNMP カードと差し替えることで Web ブラウザなどを利用して遠隔地から複数のサーバの電源管理と操作が可能である。また，SNMP（Simple Network Management Protocol）エージェント機能もあり，すでに市販の SNMP マネジャを用いてネットワーク管理をしている場合にも有効である。

### 2. 5　RoHS 指令対応

GX200 シリーズは，鉛フリーはんだを使用し，UPS 全体として，環境保護を目的とした RoHS 指令（電子・電気機器における特定有害物質の使用制限）に対応している。

図 4　過渡変動（入力電圧急変時）の応答波形

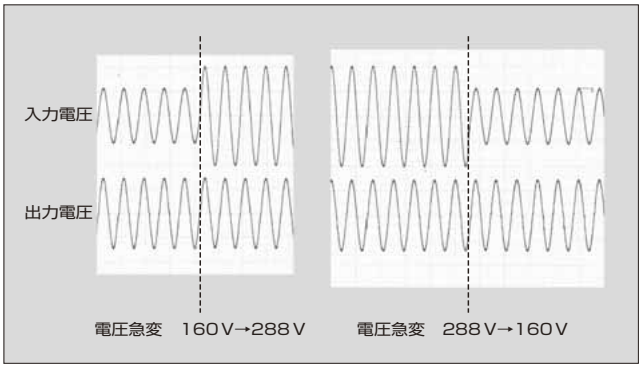



図 5　過渡変動（負荷急変時）の応答波形

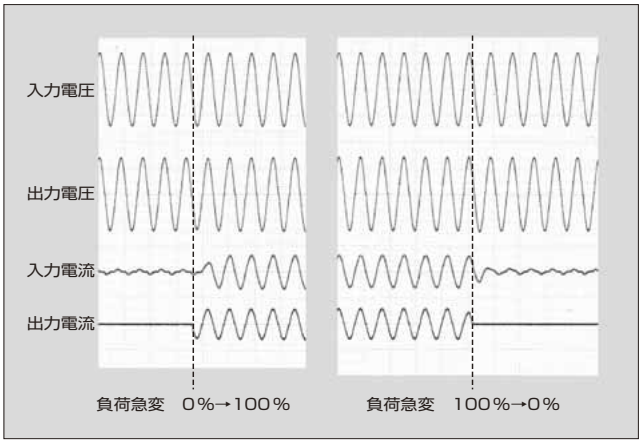


表 1　GX200シリーズの仕様と容量系列

| | | M-UPS050AD2B | M-UPS075AD2B | M-UPS100AD2B |
|---|---|---|---|---|
| 運転方式 | | デュアルコンバージョン方式 | | |
| 冷却方式 | | 強制空冷 | | |
| 入力 | 電　圧 | 160～288 V | | |
| | 相数・線数 | 単相2線 | | |
| | 周波数 | 50/60 Hz | | |
| | 最大電流 | 29 A | 44 A | 57 A |
| 出力 | 出力容量 | 5 kVA/4 kW | 7.5 kVA/6 kW | 10 kVA/8 kW |
| | 相数・線数 | 単相2線 | | |
| | 電　圧 | 200/208/220/230/240 V | | |
| | 電圧精度 | ±2% | | |
| | 波　形 | 正弦波 | | |
| | 停電切換時間 | 無瞬断 | | |
| | ひずみ率 | 6%以下 | | |
| 商用切換 | | 無瞬断（サイリスタ切換方式） | | |
| 効　率 | | 95% | | |
| バッテリー | 種　類 | 小型制御弁式鉛蓄電池 | | |
| | バックアップ時間※ | 5分 | 8分 | 5分 |
| | 公称電圧 | 192 V | | |
| 外部寸法（W×D×H） | | 130×718×434（mm） | 256×771×434（mm） | |
| 19インチラック占有スペース | | 3U | 6U | |
| 質　量 | | 63 kg | 126 kg | |
| 外部接続 | 入　力 | 端子台（M5ねじ） | 端子台（M8ねじ） | |
| | 出　力 | 端子台（M5ねじ） | 端子台（M8ねじ） | |
| 使用環境 | 周囲温度 | 0～40℃（標高 2,000 m以下）<br>0～35℃（標高 2,000～3,000 m） | | |
| | 騒　音 | 50 dB（A）以下 | 55 dB（A）以下 | |
| | 相対湿度 | 20～95%（結露なきこと） | | |

※：増設バッテリー箱を接続することでバックアップ時間の延長が可能

### 2. 6　規格対応

市場の要求に伴い，UPS に対する各種規格の要求が年々高くなってきている。GX200 シリーズは，安全性規格への対応として UL1778–4th Edition を取得済みである。

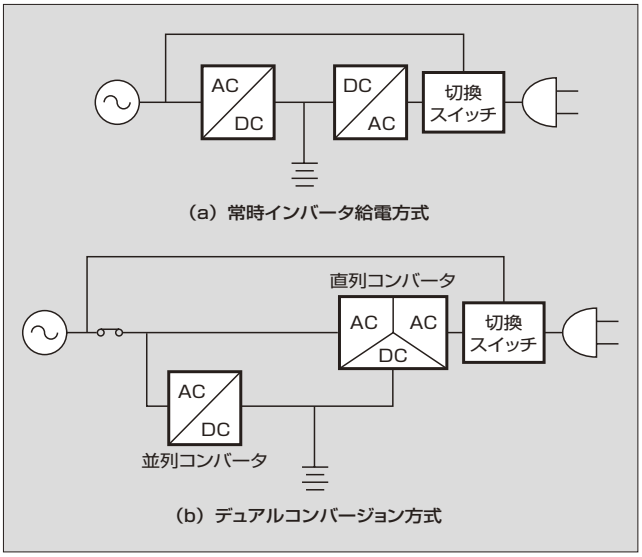
## 3　GX200 シリーズの仕様

**表 1** に GX200 シリーズの仕様と容量系列を示す。5 kVA/7.5 kVA/10 kVA の自立タイプ・19 インチラック兼用タイプの構成となっている。また，GX200 シリーズの入力電圧範囲は 160 ～ 288 V とワイドレンジ対応である。出力電圧は 200/208/220/230/240 V を外部からディップスイッチで簡単に設定できるようになっており，国内外の電源事情に対応できる仕様としている。

## 4　回路構成と動作

**図 6** に従来の常時インバータ給電方式とデュアルコンバージョン方式の比較を示す。

図 6　主回路ブロック図の比較




常時インバータ給電方式では出力するすべての電力をコンバータとインバータで変換している。一方，デュアルコンバージョン方式では，交流入力電源が規定の範囲である

場合の運転状態においては，電源電圧の変動分を直列コンバータが補償する。その結果，負荷には安定した電圧が供給される。このとき，並列コンバータは直列コンバータが電圧補償を行う際に使用するエネルギー分だけを補償しながら直流中間電圧を一定に制御する。このように，並列コンバータ部は電圧補償分だけのエネルギーを変換するため，変換損失を大幅に低減でき，高効率化を実現している。

交流電源に停電が発生すると，入力のリレーを開放すると同時に直列コンバータを用いてバッテリーから負荷に連続的に安定した電力を供給する。また，過負荷および UPS 異常時には交流入力電源に無瞬断で切換可能なバイパス回路を内蔵している。

## 5　あとがき

デュアルコンバージョン方式の高効率オンラインミニ UPS「GX200 シリーズ」の特長，仕様，回路構成などを述べた。この UPS は，高い信頼性と性能，さらには高効率といったコンピュータシステムからの要求に十分に応えられる製品となっている。また，200 V 系というこの UPS の特質を生かし，これまでのコンピュータシステム用途だけでなく，各種製造装置などへの組込み電源分野への展開が期待される。今後は，オプション製品の充実と一層の信頼性向上を図るとともに，幅広い顧客のニーズに応えるべく UPS の開発，製品化に注力していく所存である。

**参考文献**

(1)　内藤英臣ほか．富士ミニ UPS「GX シリーズ」．富士時報．vol.77, no.6, 2004, p.449–452.

(2)　山方義彦ほか．並列冗長方式ミニ UPS「RX シリーズ」．富士時報．vol.77, no.6, 2004, p.453–457.

# 情報通信を支える分散電源システム



保高　伸洋（ほたか　のぶひろ）　　軽部　邦彦（かるべ　くにひこ）　　多和田 信幸（たわだ　のぶゆき）

## 1　まえがき

交流電圧から直流電圧に変換するスイッチング電源は，近年では多くの電子機器に搭載されている。その世界市場規模は2007年では1兆1,500億円（予測）と非常に大きく，電子機器の進歩とともに，その市場を拡大している。その中でも特に，情報通信分野の装置では，多数の大規模集積回路〔LSI：CPU，メモリ，FPGA（Field Programmable Gate Array）など〕を使用しており，電源の需要も増加していく傾向にある。これらLSIの進歩は著しく，集積度の向上，動作周波数の高周波化により，電源に対しても低電圧・大電流化，高速な電圧過渡応答が要求されている。

富士電機では，30年間にわたり情報通信分野の電源システムに取り組んでおり，多様なお客様のニーズの変化に対応している。本稿では，これらのニーズに対応した技術と製品例を紹介する。

## 2　分散電源システムの必要性

従来の電源システムは，**図1**に示すように電源ユニットと装置のマザーボードの間を配線で接続し，負荷となるLSIの周辺にコンデンサを配置することによる集中給電方式で構成されていた。

この方式では，LSIの動作電圧が5V，3.3V程度であれば，マザーボードのパターンインピーダンスの影響を比較的少ない容量のコンデンサで吸収でき，またLSI自身の定格電圧が高い分，動作電圧許容範囲が広いため，負荷変動時においても正常動作させることが可能であった。

しかし，最近では，LSIの定格電圧が1V台（1Vを切った製品もある）に低下し，さらに動作周波数（クロック周波数）も高くなり，集中給電方式では，これらLSIの高機能化に対応できず，装置メーカー，電源メーカーの共通の課題となっていた。この対策として，LSIの直近に電源を設けて，集中給電方式で問題になったパターンインピーダンスの影響，コンデンサの増加を抑えた分散給電システムが検討されている。**図2**にその一例を示す。

図1　従来の集中給電方式

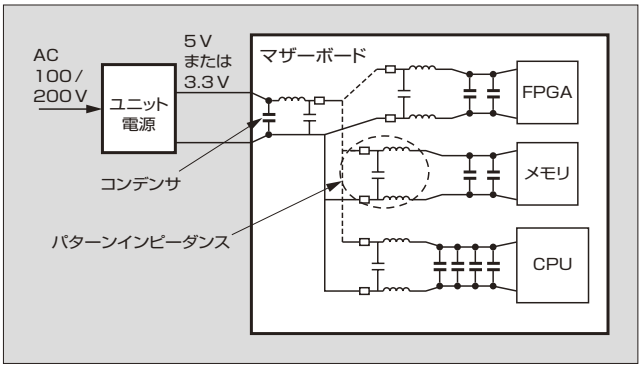
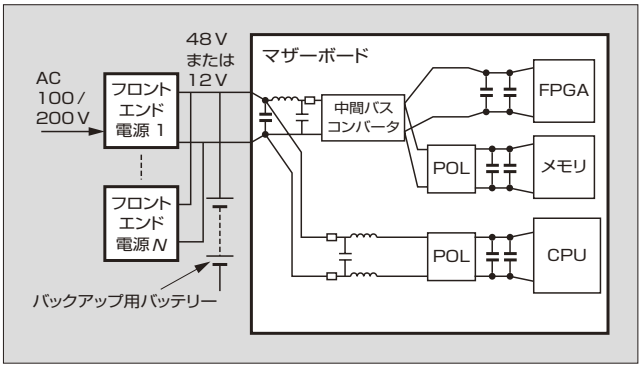



図2　分散給電方式の一例




分散電源システムは，次の三つの部分に分けられる。

(1)　フロントエンド電源
(2)　中間バスコンバータ
(3)　POL（Point of Load）コンバータ（以下，POLと略す）

以降，これら三つの電源について説明する。

## 3　フロントエンド電源

フロントエンド電源は，AC100VあるいはAC200Vの商用交流電源を整流平滑して，DC48V，12Vなどの中間直流電圧に変換する電源である。この電源に要求される特性

**保高　伸洋**

交流無停電電源および直流安定化電源の開発・設計に従事。現在，富士電機ハイテック株式会社設計開発部部長付。

**軽部　邦彦**

高周波交流電源および直流安定化電源の開発・設計に従事。現在，富士電機ハイテック株式会社設計開発部課長。電気学会会員。

**多和田 信幸**

直流安定化電源の主回路，制御回路の開発・設計に従事。現在，富士電機ハイテック株式会社設計開発部。

図3　2kW 出力フロントエンド電源（型式：FH2000）

表1　FH2000の仕様

| | | | |
|---|---|---|---|
| 入力特性 | 入力電圧 | AC100/200V | |
| | 周波数 | 50/60Hz | |
| | 突入電流 | 20A以下 | |
| | 効　率 | 89.5%以上（入力定格，2,000W出力時） | |
| | 力率/高調波<br>電流規制 | 95%以上<br>JEIDA　EN61000-3-2（準拠） | |
| 出力特性 | | チャネル1 | チャネル2 |
| | 出力電圧 | +48V | +12VSB |
| | 定格電流 | 40.6A※ | 4A |
| | 最小電流 | 0.4A | 0A |
| | リプルノイズ | 480mVp-p | 120mVp-p |
| | 総合変動 | ±5% | ±4% |
| | 過電圧保護 | 51～55V | − |
| | 過電流保護 | 110～150% | 100～150% |
| 環境条件 | 動作温度<br>動作湿度 | 0～50℃<br>20～85%RH | |
| | 保存温度<br>保存湿度 | −40～+70℃<br>5～95%RH | |
| | 耐振動 | 0.5G　3～60Hz　1サイクル/2分×5 | |
| | 過熱保護 | あり | |
| 規　格 | 安全規格 | UL/CSA/TUV/VDE | |
| | ノイズ規格 | CISPR/FCC Class A（準拠） | |
| その他 | 寸法（mm） | W：69.5，D：326.3，H：123.5<br>（突出部含まず） | |
| | 質　量 | 3.5kg以下 | |
| | 冷却条件 | 強制風冷 | |

※：100V系入力時は19.8A

図4　1kW 出力フロントエンド電源（型式：FH1000BS）

表2　FH1000BSの仕様

| | | | |
|---|---|---|---|
| 入力特性 | 入力電圧 | AC100～240V | |
| | 周波数 | 50/60Hz | |
| | 突入電流 | 40A以下 | |
| | 効　率 | 83%以上（入力200V，1,000W出力時） | |
| | 力率/高調波<br>電流規制 | 95%以上<br>JEIDA　EN61000-3-2（準拠） | |
| 出力特性 | | チャネル1 | チャネル2 |
| | 出力電圧 | +12V | +5VSB |
| | 定格電流 | 84A | 4A |
| | 最小電流 | 1A | 0.2A |
| | リプルノイズ | 120mVp-p | 120mVp-p |
| | 総合変動 | ±5% | ±5% |
| | 過電圧保護 | 13.5～15.5V | − |
| | 過電流保護 | 88A以上 | 4.4A以上 |
| 環境条件 | 動作温度<br>動作湿度 | 0～45℃<br>20～85%RH | |
| | 保存温度<br>保存湿度 | −40～+85℃<br>5～95%RH | |
| | 耐振動 | 1.5G　5～400Hz　1サイクル/2分×5 | |
| | 過熱保護 | あり | |
| 規　格 | 安全規格 | UL/CSA/TUV/VDE | |
| | ノイズ規格 | VCCI Class A，FCC Class A，<br>EN55022 Class A（準拠） | |
| その他 | 寸法（mm） | W：106，D：492，H：42<br>（突出部含まず） | |
| | 質　量 | 3kg以下 | |
| | 冷却条件 | 強制風冷 | |

としては，小型，高効率，並列冗長機能[(1)]を挙げることができる。

富士電機では，SSI（Server System Infrastructure）という情報通信電源仕様に基づいた製品を，ここ数年にわたり開発している。外形寸法はこの仕様に適合した大きさで固定し，出力を，1kW から 1.5kW へ，さらに 2kW へと容量アップした製品化を行い，現在 3kW 出力の電源を製品化中である。

**図3** に 2kW 電源の外観，**表1** に仕様を示す。この電源の特長として，変換回路にソフトスイッチング回路を適用することで，1kW の製品と比較して 5 ポイントの効率向上ができた。

またサーバの薄型化により，電源の厚さにも制限が発生している。最近ではブレードサーバ用として厚さ 1U（約 44.5mm）のラックに収納できる電源を製品化した。**図**

**4** に外観，**表 2** に仕様を示す。出力電圧が 12 V のため，出力の整流回路に従来はダイオードを用いていたが，MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）による同期整流モジュールを開発適用することにより，低損失化を行い，1U サイズへの小型化と高効率化を実現した。

どちらの電源も複数台並列させて使用されるので，並列冗長機能が付加されており，電源故障発生時にもこれが原因で装置のシステムダウンが発生しないように配慮されている。

## 4　中間バスコンバータ

中間バスコンバータは，フロントエンド電源の出力の後段にあり，POL の入力電圧に変換する役割，および直接 LSI に電力供給する役割を持つ DC-DC コンバータである。このコンバータには**図 5**，**図 6** に示すように，二つの方式がある。フロントエンド電源の出力電圧精度が高い場合には，LSI などの負荷電圧制御を後段にある POL で行うようにすれば，**図 5** のように固定パルス幅の変換器を用いることができるため，非常に設計が簡単になり，小型化・高効率化できる電源である。しかし，**図 6** のように入力電圧にバッテリーを付加して，商用電圧の停電に対応する場合や，POL の入力電圧範囲が狭い場合は，出力電圧を監視する制御回路により，可変パルス幅の変換器を用いて出力電圧を安定化する必要がある。富士電機では，バッテリーバックアップ機能が付加できるように，後者の方式を採用している。100 W 出力のコンバータの外観を**図 7**，主な仕様を**表 3** に示す。今後，この分野の電源はさらなる小型化が進むと予測しており，より高電力密度の製品を開発中である。

図 5　バスコンバータの変換比 4：1 で固定した場合

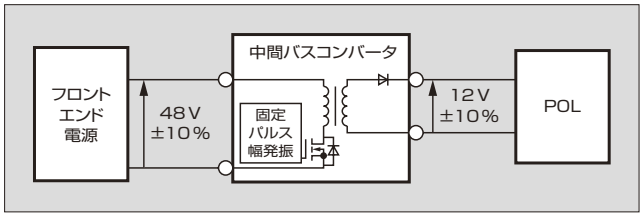



図 6　バスコンバータの変換比を制御した場合

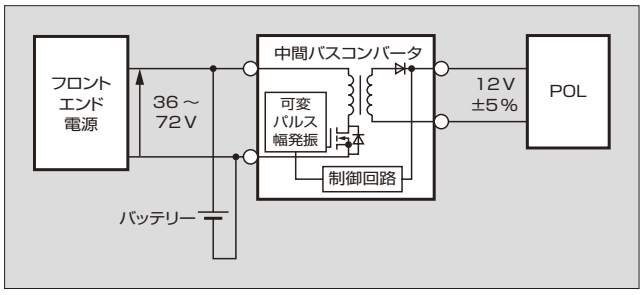
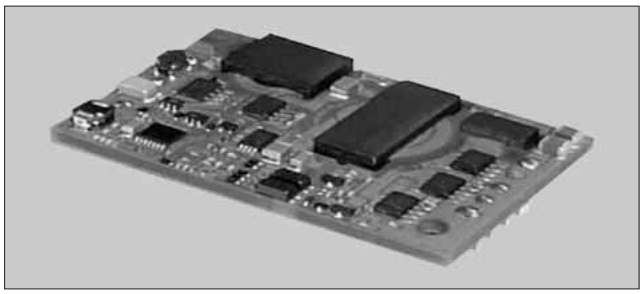



図 7　48 V 入力 100 W 出力中間バスコンバータ
（型式：FH0100DI）



## 5　POL

負荷となる LSI の直近に配置される電源が POL である。POL に要求される性能としては，小型・高効率であることはもちろん，負荷急変時の電圧安定性がよいことである。先にも示したが，LSI の動作電圧の低下により，許容動作電圧変動範囲が非常に狭くなっている。さらに高速動作するため，負荷電流の変動が，短時間で非常に大きく，この変動に対して出力電圧の変動を数十 mV まで抑え込まなければならない。

この問題に対応するため，CPU 用の POL では，マルチフェイズスイッチング方式を採用し，また小容量の POL では，主回路と制御回路が一体化され，電源の制御に DSP を適用した専用 IC を用いて，電源の負荷急変に対する応答性を確保している。

**図 8**，**表 4** に CPU 用 POL の例を示す。この電源は，3 出力であり，そのうち 2 出力が CPU からの信号により出力電圧を 5 mV ステップで可変する機能を持っている。本電源は，インテル株式会社のサプライヤーコンタクトリス

表 3　FH0100DI の主な仕様

| | |
|---|---|
| 入力電圧 | DC36～72 V |
| 出力電圧 | 5 V |
| 出力電流 | 20 A |
| 効　率 | 最大92 % |
| 寸　法 | W：57.9，D：36.8，H：10.2（mm） |

図 8　48 V 入力 CPU 用電源（型式：FH100MV）

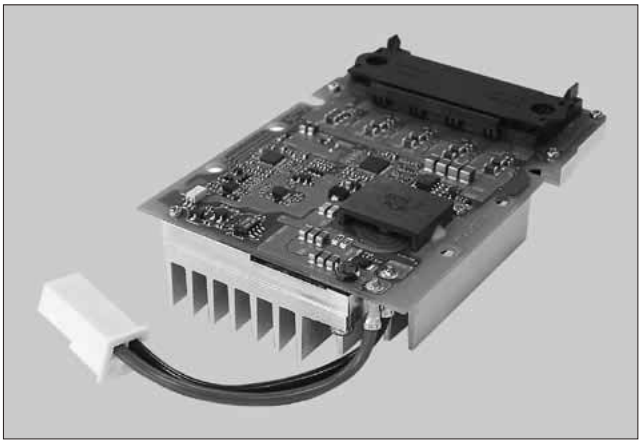


表 4　FH0100MVの仕様

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 入力特性 | 入力電圧 | DC43.2～52.8 V | | |
| | 突入電流 | 12 A以下 | | |
| | 効　率 | 74～81.8 % | | |
| 出力特性 | | Core | Cache | Fixed |
| | 出力電圧 | 0.8～1.3 V | 0.8～1.3 V | 1.25 V |
| | 定格電流 | 89 A | 17 A | 9.2 A |
| | ピーク電流 | 121 A | 18 A | 11.04 A |
| | 最小電流 | 2.8 A | 2 A | 0.7 A |
| | リプルノイズ | 5 mVp-p | 5 mVp-p | 5 mVp-p |
| | 総合変動 | ±60 mV | ±40 mV | ±40 mV |
| | 過電圧保護 | 1.69～2.21 V | 1.69～2.21 V | 1.56～2.04 V |
| | 過電流保護 | ピーク電流×110～150 % | | |
| 環境条件 | 動作温度<br>動作湿度 | 0～60℃<br>5～85 %RH | | |
| | 保存温度<br>保存湿度 | −40～+70℃<br>5～95 %RH | | |
| | 耐 振 動 | 0.2 G　5～500 Hz　1サイクル/2分×5 | | |
| | 過熱保護 | あり | | |
| 規　格 | 安全規格 | UL/CSA/EN/CE | | |
| | ノイズ規格 | – | | |
| その他 | 寸　法 | W：70，D：111.5，H：34（mm）<br>（突出部含まず） | | |
| | 質　量 | 290 g以下 | | |
| | 冷却条件 | 強制風冷 | | |

図 9　5 V 入力 小容量 POL

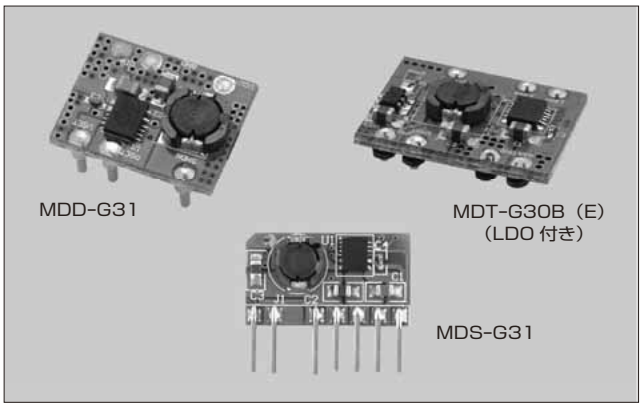



表 5　MDT-G30 B（E）の主な仕様

| | |
|---|---|
| 入力電圧 | DC3.0～5.5 V |
| 出力電圧（メイン） | 0.72～3.63 V |
| 出力電流（メイン） | 3 A |
| 出力精度（メイン） | ±2 % |
| スイッチング周波数 | 1 MHz |
| 出力電圧（LDO） | B：3.3 V　E：2.5 V |
| 出力電流（LDO） | 800 mA |
| 出力精度（LDO） | ±0.5 % |
| 動作時周囲温度 | −40～+85℃ |
| 効　率 | 最大95 % |
| 寸　法 | W：20.2，D：15.5，H：5.5（mm） |

出力電圧（メイン）は外付け抵抗により調整
メインはスイッチング出力，LDOはリニアレギュレータ出力

トに国内メーカー品では唯一登録されている（2006 年 10 月現在）。

**図 9** に小容量 POL の例を示す。このシリーズは，主回路と制御回路を一体化した IC を使用しており，スイッチング制御をデジタル化している。外付け部品がアナログ制御の場合と比較して半減し，小型化されている。さらに，1 出力タイプと 2 出力タイプの製品や出力電流が大きい（5 A）製品もラインアップしている。**表 5** に 2 出力タイプの主な仕様を示す。

## 6　あとがき

情報通信装置の LSI の進化に伴う，電源システムの変化とその一例を示した。今後の進化アイテムとしては，デジタル制御を適用し，上記 3 種類の電源の最適駆動化（電源システムの効率を最大で動作，各電源の起動停止シーケンスの調整など），さらに小容量 POL で実績のある DSP 適用による電源自体の制御をその他の電源にも適用していく。富士電機では顧客である装置メーカー，LSI メーカーと情報交換をしながら，より最適な分散電源システムの開発に今後も取り組んでいく所存である。

### 参考文献

(1)　保高伸洋，軽部邦彦．無停止化技術を適用した直流電源．富士時報．vol.77, no.6, 2004, p.467–471.

# 鉄道車両におけるパワーエレクトロニクス技術



井上　亮二（いのうえ　りょうじ）　　大庭　政利（おおば　まさとし）

## 1　まえがき

地球温暖化対策の国際的な枠組みとして 1997 年 12 月に採択された京都議定書は 2005 年 2 月に発効に至り，正式に国際法としての効力を持つようになった。

わが国では二酸化炭素（$CO_2$）などの温室効果ガスの排出量を，2008 ～ 2012 年には 1990 年に比べ 6％削減する義務を負う。運輸部門の $CO_2$ 排出量は日本全体の約 2 割で，そのうち 9 割は自動車が占めている現状の中で，鉄道は最もエネルギー効率が高く地球環境に優しい大量・高速・安全かつ経済的な輸送手段である。

環境負荷の小さい鉄道・海運利用へと貨物輸送を転換するモーダルシフトも環境対応という理念がベースとなっていることなどから，地球環境というキーワードの中で鉄道は，今後とも重要な役割を担っていくとともに持続的に発展を続けていく必要がある。

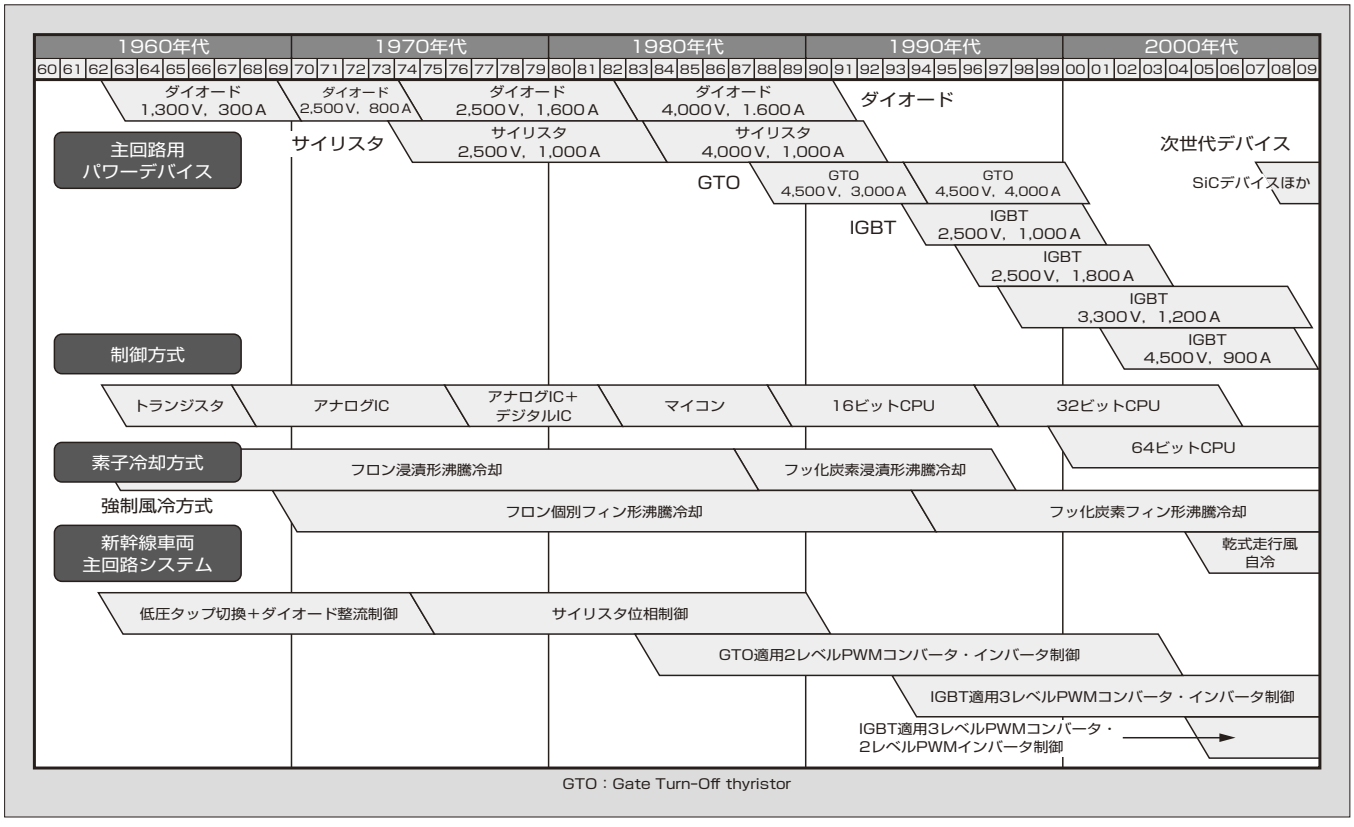
本稿では，富士電機における鉄道車両におけるパワーエレクトロニクス技術について紹介する。

## 2　新幹線車両主回路システム

### 2.1　主回路システム技術の変遷

新幹線車両主回路システムは，1964 年に開業した東海道新幹線において，210 km/h での営業運転が開始された

図 1　新幹線車両主回路システム技術の変遷




GTO：Gate Turn-Off thyristor

**井上　亮二**

鉄道車両用電気品のエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社システム機器事業本部車両・特機統括部車両技術部担当部長。

**大庭　政利**

鉄道車両用電気品のエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社システム機器事業本部車両・特機統括部車両技術部担当課長。

0系新幹線車両に始まり，安全性，信頼性，経済性に対する要求はもちろんのこと，その後のさらなる高速化，省エネルギー化，省メンテナンス化，乗り心地・快適性の向上，環境調和への対応といった時代の要請に応えながら，技術革新を実現してきた。**図1**に新幹線車両主回路システム技術の変遷を示す。

富士電機は，新幹線の初代営業車両である東海道新幹線0系から，2007年7月1日より営業運転に投入予定の東海道・山陽新幹線直通用次世代車両であるN700系に至るまで，主回路電気品（主変圧器，主変換装置，主電動機）を納入してきた。

新幹線車両主回路システムにおける技術進歩は，主電動機を駆動制御するコンバータ・インバータ（CI：主変換装置）の主回路パワーデバイスの高性能・高耐圧・大容量化とそれらを制御するマイクロプロセッサの高性能・高機能・高速化といったパワーエレクトロニクス技術およびマイクロエレクトロニクス技術の目覚ましい進歩に負うところが非常に大きい。

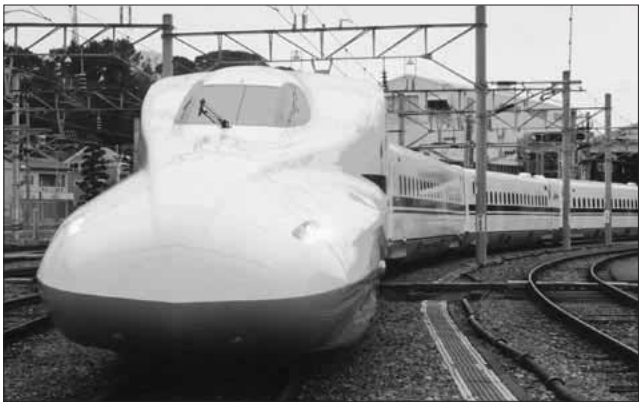
最新のN700系の主回路システムは，パワーデバイスの主流であるIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を適用した3レベルPWM（Pulse Width Modulation）コンバータ・インバータ方式を核として高性能・高機能・低騒音化を図ることによって乗り心地・車内静粛性などを向上させるとともに，環境適合，省エネルギー化を実現している。主変換装置には64ビットマルチCPU構成の制御装置を搭載し，多岐にわたる制御演算処理を高速・高精度で実行している。この制御では，加速性能を確保しながら乗り心地の向上を可能とする新開発の複数モータ駆動ベクトル制御と空転再粘着機能を搭載，また騒音・振動を抑制するためのキャリヤ周波数変調機能を付加した新PWM方式を採用している。

### 2.2　主回路システムの現状

新幹線車両の質的向上を目指すために，PWM制御の波形ひずみの影響による主変圧器，主電動機の電磁騒音の低減が課題とされ，富士電機は，1996年，東海旅客鉄道株式会社（JR東海）と共同で300系新幹線車両に2,500V，1,000A平形IGBTを適用した3レベル主変換装置を試作開発し，世界で初めて本線走行試験を行い，波形改善効果による電磁騒音低減と高調波電流抑制の効果が確認された。

その成果をベースとして，現在のJR東海の主力新幹線車両である700系の先行試作車が1997年に開発された。700系の主回路システムは，パワーデバイスにIGBTを適用した3レベル制御方式を採用したことにより，高調波損失の低減が図れ，主回路機器の低損失化が可能となり，4両（3M1T）で1ユニットを構成し，16両編成内で4ユニット構成とし，主変圧器の大容量化および集約化が可能となった。その結果，編成内の主変圧器台数を300系の5台から4台へ減らし，主回路システムの一層の軽量化を達成している。ユニットの中で主変圧器二次巻線を3分割して3台のIGBT適用3レベルコンバータが接続され，フィルタコンデンサを有する直流回路を介して，IGBT適用3レベルインバータに電力を供給し，並列接続された4台の誘導電動機を駆動している。

図2　N700系新幹線車両（写真提供：JR東海）



JR東海と西日本旅客鉄道株式会社（JR西日本）は，東海道・山陽新幹線直通車両として，700系をベースにさらに進化させたN700系を共同開発した。N700系新幹線車両の外観を**図2**に示す。加速性能・曲線通過速度を向上させた最速車両で，かつ乗り心地・車内静粛性に配慮した快適性の向上，さらに，環境への適合，省エネルギー化を図った環境性能の向上をコンセプトとし，それらを実現するために主回路システムは，編成出力を向上するよう，機器の大容量化を図っている。同時に，車内騒音低減のために機器の騒音低減に配慮しつつ，最適軽量化設計を徹底させ，主回路システムの大幅な軽量化が図られている。

### 2.3　N700系主回路システム電気品

#### 2.3.1　主回路システム

新幹線車両における主回路システムの課題は，高速安定走行のために大容量化と小型軽量化の相反する要求を同時にバランスよく満足することにある。これまでに述べてきたように大容量化と小型軽量化を両立させて達成するために，1990年代にPWMコンバータ・インバータシステムが実用化され，さらなる大容量化と小型軽量化および機能・性能向上が図られた。さらにN700系では質的な向上を目指し，環境への適合と省エネルギー化を推進し，さらに車内快適性の向上を達成している。N700系主回路システムを**図3**に示す。

N700系主回路システムにおける700系からの変更点は，以下のとおりである。

(1)　車両性能（起動加速度・最高速度）の向上に伴う編成最大出力の増加とユニット構成の変更

起動加速度を2.6km/h/s（700系：2.0km/h/s），最高運転速度は山陽区間で300km/h（700系：285km/h）へ性能向上のため，編成出力を17,080kW（700系：13,200kW）とし，30％アップしている。それに伴い，電動車（M車）と付随車（T車）の比率を向上させ，14M2T編成（700系：12M4T編成）としている。主回路システムは，14M2T編成の中で，4両を1ユニット構成

とし，4M ユニットと 3M1T ユニットの 2 種類のユニット構成としており，編成出力を向上するため，機器の大容量化を図っている。主回路システムのパフォーマンス（出力質量比）を 300 系の約 2 倍，700 系の 1.2 倍とし，大幅な軽量化を達成している。

(2)　省エネルギー化推進による電力消費量の低減

走行抵抗の低減や，編成全体のブレーキ力を 14 両の電動車で負担することによる回生電力の増加などにより，東京－新大阪間の走行で電力消費量を 700 系よりも 10％程度低減できる見込みである。

### 2.3.2　主変換装置

(1)　TCI3 形主変換装置

主変換装置は，PWM コンバータと VVVF（Variable Voltage Variable Frequency）インバータで構成され，コンバータ制御およびインバータ制御を行う制御装置が内蔵されている。インバータには主電動機 4 台が並列接続されており，基本的な回路構成は 700 系と同じとしている。主変換装置主回路部はコンバータ部，フィルタコンデンサ部，インバータ部で構成され，コンバータ，インバータともに 3 レベル方式を採用している。また主半導体素子は，高耐圧・大容量かつ低損失の IGBT モジュール（3,300 V，1,200 A）を採用し，コンバータは 2 並列，インバータは 1 並列接続で構成している。

(a)　小型軽量化

約 10％の出力向上を図りながら，700 系主変換装置に比べ体積で約 3％，質量で約 15％の小型軽量化を実現している。

(b)　高効率化

スナバ回路の省略，低損失 IGBT の採用により装置の変換効率向上を図った。

(c)　保守作業性の向上

コンバータユニットおよびインバータユニットの交換作業は車両側面に引き出す方式とし，ゲートアンプ，制御コネクタ，主半導体素子チェック端子は車両側面に配置し保守作業性の向上を図った。

N700 系 TCI3 形主変換装置の外観を**図 4** に，装置内部構成を**図 5** に示す。

(2)　ブロアレス主変換装置（TCI905C 形主変換装置）

富士電機は JR 東海と共同で，主変換装置のさらなる軽量化を目的として，主半導体素子の冷却用のブロアモータを廃止したブロアレス主変換装置を開発した。この装置の質量は，N700 系 TCI3 形に比べて約 12％の軽量化を実現した。主半導体素子の冷却は装置底面に冷却フィンおよびスロープを設け，車両走行時に車両床下に発生する走行風を冷却フィンに取り込むことにより行う。装置底面の走行風の流れを**図 6** に示す。

図 3　N700 系新幹線車両主回路システム

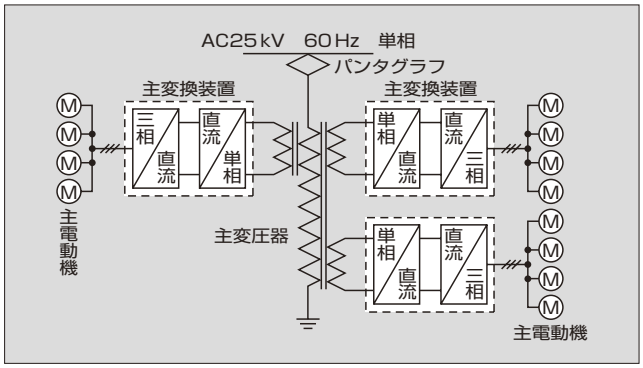



図 4　N700 系新幹線車両用 TCI3 形主変換装置

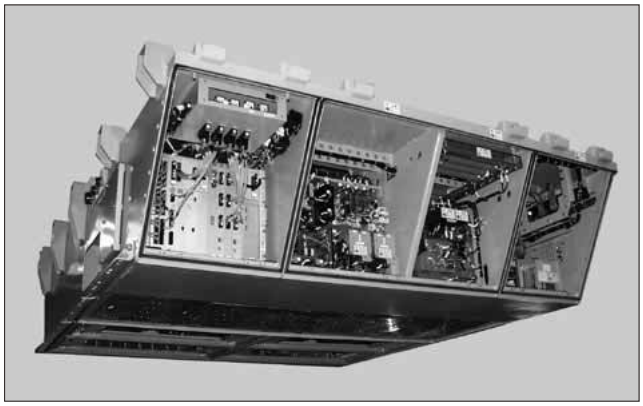


図 5　N700 系新幹線車両用 TCI3 形主変換装置の構造

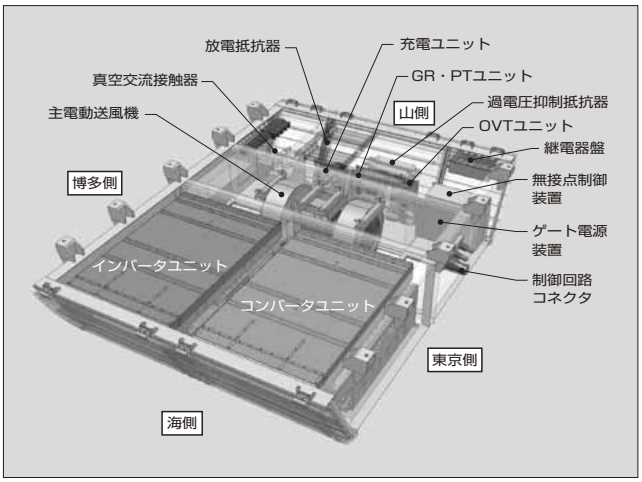



図 6　ブロアレス CI の外観と冷却メカニズム（走行風の流れ）

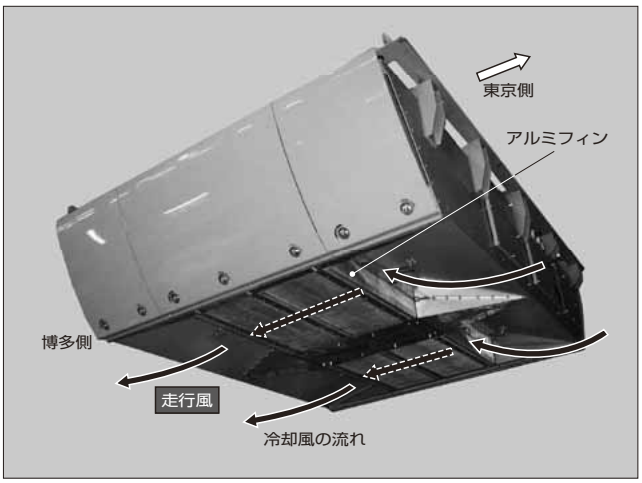
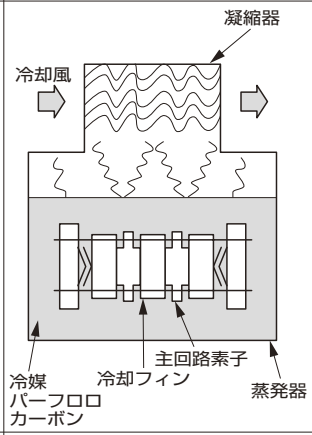
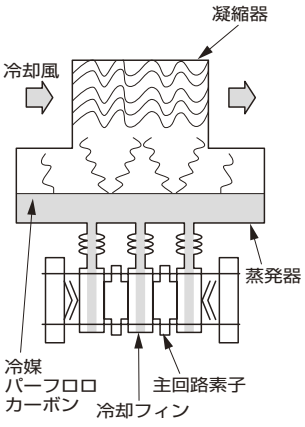
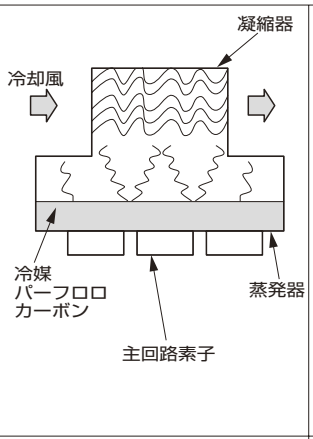
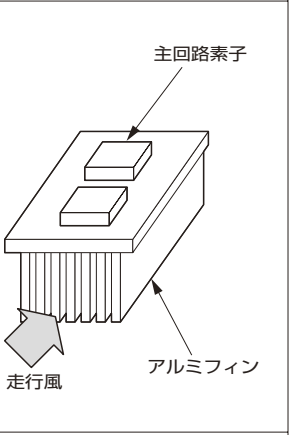


表1　主回路素子（パワーデバイス）冷却方式の変遷

| 車両形式 | 300系 | 700系 | N700系 | |
|---|---|---|---|---|
| CI 形 式 | TCI1A | TCI2A | TCI3 | TCI905C |
| CI 出 力 | 300kW×4=1,200kW | 275kW×4=1,100kW | 305kW×4=1,220kW | |
| 冷却方式 | 沸騰冷却<br>＋<br>素子：タンク浸漬方式<br>＋<br>ブロア強制風冷 | 沸騰冷却<br>＋<br>素子：個別冷却フィン方式<br>＋<br>ブロア強制風冷 | 沸騰冷却<br>＋<br>素子：冷却板上取付け方式<br>＋<br>ブロア強制風冷 | アルミフィン冷却<br>＋<br>素子：冷却板上取付け方式<br>＋<br>走行風自冷 |
| 主回路素子 | GTO<br>（平形・非絶縁構造） | IGBT<br>（平形・非絶縁構造） | IGBT<br>（モジュール形・絶縁構造） | |
| 構造 |  |  |  |  |
| 特徴 | ○冷却器が小型 | ○冷媒が少量<br>○冷却器が小型 | ○主回路素子の取付け構造がシンプル | ○主回路素子の取付け構造がシンプル<br>○ブロアの保守が不要<br>○ブロア分質量の軽減<br>○温室効果ガスの不使用 |

主半導体素子の冷却は新幹線車両の主変換装置では沸騰冷却方式が主流であったが，ブロアレス主変換装置では冷媒や凝縮器が不要で形状がシンプルなアルミフィンとしている。アルミフィンは冷却性能と軽量化を両立するために熱流体解析およびモックアップ製作による性能検証を行い，形状を決定した。主半導体素子冷却方式の変遷および各方式の得失を**表1**に示す。

(3)　無接点制御装置

N700系主変換装置に搭載している無接点制御装置は，64ビットCPUをコアとしたマルチプロセッサ構成とすることで，多岐にわたる制御演算処理が高速・高精度で実行可能となっている。データ通信技術・回路集積化技術を盛り込み，部品点数の削減を図り，多機能化・高信頼化を図っている。

入出力機能として，運転指令などの伝送による入力，運転状態のモニタ情報の伝送による出力にも対応している。無接点制御装置の外観を**図7**に示す。

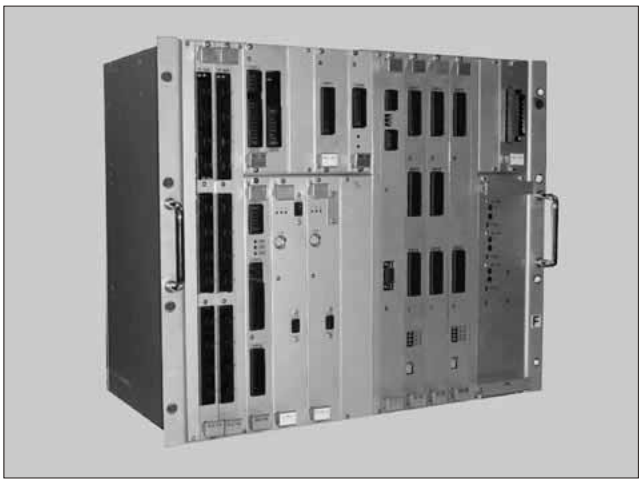
無接点制御装置では，モニタ通信・シーケンス制御のほか，直流電圧制御，交流電流制御，中性点電位制御，モータトルク制御などのコンバータ・インバータ制御を行っている。

(a)　中性点電位制御

3レベル変換器では，運転条件によっては直流中性点に対して正側と負側のフィルタコンデンサを還流する電流に差が生じると中性点電位が変動し，特定の素子に過大な電圧が印加されるおそれがある。富士電機は主回路素子のスイッチング休止期間での中性点電位の挙動に着目し，電力や電流の極性に依存しない中性点電位制御を開発し，実用化している。

本方式は，正負のフィルタコンデンサの充放電電荷量を直接制御しているため，中性点電位の制御応答の高速化が可能となり，中性点電位の変動幅を低減することができる。さらに，コンバータ・インバータが扱う電力や交流電流の極性による制御系の切換動作をすることなく，交流電流のゼロクロス付近でも安定した制御を実現した。

図7　無接点制御装置



(b)　モータトルク制御

安定したトルク出力を実現するためには，主電動機の力行・回生トルクを高速応答・高精度で制御する必要がある。富士電機は，産業分野での豊富な実績を基に，従来はベクトル制御の適用が困難であるとされていた1インバータ4モータ制御においても良好な制御特性を発揮するベクトル制御を実用化した。

①　1インバータ4モータ制御への適用

従来のすべり周波数形ベクトル制御は，1インバータ1モータ制御において，空間ベクトルとして互いに直交関係にある励磁電流成分とトルク電流成分を誘導電動機の等価モデルとすべり周波数に基づいて，独立に制御する方式である。これに対して，一般的に新幹線車両の主回路システムは，1インバータ4モータ制御方式であり，これに対応するために富士電機はモータの並列台数に関係なく，共通の状態量と見なせる磁束の位相角を基準にして制御を行っている。

②　1パルスモード制御

車両駆動用制御には，インバータの電圧利用率が最大となる1パルスモード運転を含んでいる。1パルスモードでは，電圧振幅の調節ができず，従来のベクトル制御をそのまま適用することができない。これに対して，本ベクトル制御方式では，1パルスモードの領域においても，電圧振幅制御が可能な1’パルスモードとすることで励磁電流とトルク電流とを独立に制御し，ベクトル制御の本質を損なうことなく優れた特性を実現することができる。

③　モータ二次抵抗の温度変動補償

モータ二次抵抗は運転中の温度変化により大きく変化するが，ベクトル制御を行ううえでモータの等価モデルの二次抵抗との乖離（かいリ）が大きくなると電圧ベクトル管理を正しく行うことが困難となる。ベクトル制御では，二次抵抗誤差が，モータ誘起電圧の無効分として現れることを利用し，これをゼロとするようにすべり周波数を補正することで，モータ二次抵抗の温度変動分を補償している。

④　モータ電磁音の低減

PWMスイッチング周波数によりモータからその周波数の電磁音が発生し，周波数により非常に耳障りな音になる。今回このモータの耳障り音を低減するために，一部の速度帯でキャリヤ周波数を変化させる機能を追加した低騒音PWM方式を採用している。

### 2.4　新幹線車両主回路システムの将来動向

新幹線車両主回路システムは，パワーデバイスの高機能・高性能・大容量化とそれらをきめ細かく高速に制御するパワーエレクトロニクスの進歩とともに進展してきた。車両主回路システムのパワーデバイスの主流となったIGBTは，さらに低損失化，高周波スイッチング化され，より一層の主回路電気品の小型軽量化，高効率化，低騒音化，省エネルギー化，高調波電流低減などの環境性能向上が図られると考えられる。さらに低損失な高耐圧IGBTの開発により，主回路半導体素子数が少なく，主回路がシンプルな2レベル制御方式をインバータ部に適用した主変換装置も実用化されていくと考えられる。

環境性能をさらに向上させるために徹底した軽量化とさらなる高効率化を目指して，主回路システムの方式変更も視野に入れた永久磁石同期電動機駆動システムの実用化も今後進んでいくと考えられる。

## 3　在来線車両用補助電源装置

直流電車の駆動・補助電源装置はインバータ技術としての共通性が高く，双方とも架線電圧に最適な電圧のIGBTを適用した2レベルインバータ方式としている。

補助電源装置は近年その重要性がますます高まっており，小型軽量・高信頼・高効率・省メンテナンスに加えて冗長性や静粛性が要求される。今後，さらなる省エネルギー・車内快適性を目指して，高周波スイッチングと低損失という二律背反をクリアする新しい回路方式による補助電源装置を提供していく計画である。

鉄道車両き電方式には，直流き電と交流き電があるため，補助電源装置も直流電車用と交流電車用の2種類に大別される。富士電機は各種車両・顧客ニーズに合わせて両方式に適合した装置の系列化を図り，最適な装置を提供することができる。

### 3.1　直流電車用補助電源装置

直流き電には架線電圧がDC1,500 V，DC750 V，DC600 Vがあり，架線電圧および回路構成に合わせ主回路に適用する半導体IGBTの最適な電圧・電流を選定している。回路構成を工夫して架線電圧と素子電圧の整合を図った代表的な装置として二多重方式がある。基本となる1.7 kV耐圧のIGBTを適用したインバータユニットを二組直列に接続し，それぞれのインバータユニットの出力を出力変圧器で結合させることで，DC1,500 Vの架線電圧に対応している。本構成はキャリヤ周波数を上げることが可能となり，より低騒音化を図ることができる。DC750 V，DC600 Vの架線電圧に対しては，二多重方式に適用しているインバータユニットの一組を適用し，また二組のインバータユニットを並列接続することにより，大容量要求への対応を可能としている。一方，DC1,500 Vの架線電圧用インバータユニットとして，3.3 kV耐圧のIGBTを適用し，多重接続することなく，一組のインバータユニットで構成し，部品点数の低減，信頼性の向上を図った装置がある。それぞれの主回路構成を**図8**，**図9**に示す。

### 3.2　交流電車用補助電源装置

交流電車の架線電圧には新幹線のAC25,000 V，在来線のAC20,000 Vがある。交流電車では一般的に冷房装置などの大容量負荷は直接主変圧器から電力が供給されているため，補助電源装置の負荷はそれ以外の小容量負荷となる。

しかし，その負荷は表示灯，室内灯，制御電源などであり，最重要負荷である。代表的な装置として，主変圧器三次巻線の単相交流電源をダイオード整流器と IGBT チョッパを用いて整流して直流電源とし，直流負荷へはここから供給，交流負荷へはその直流電源を IGBT インバータ装置と出力変圧器により単相交流として給電する構成がある。主回路構成を**図10**に示す。

### 3.3 特　徴

富士電機が製品化している在来線車両用補助電源装置の最新の適用技術と特徴を以下に述べる。

(1)　冗長システム

鉄道車両は公共性が高く，車両故障などが社会や人に与える影響は少なくない。そこで従来から車両用電気品は編成内の冗長性を高くとっており，補助電源装置も例外ではない。補助電源装置の場合，一般的に編成で 2 台の補助電源装置に負荷を分担し，1 台が故障した場合は回路を切り換え，冷房装置の負荷を半減させ，1 台の補助電源装置でも運転が継続できる延長給電システムを採用している。ところが，近年，価値観・ニーズの高度化に伴い，補助電源装置の故障時にもサービス・性能を低下させないシステムが求められるようになってきた。また，地方線区を走行する短編成車両では，補助電源装置を 2 台搭載するスペースはなく，故障時には車両運休となることは必至であった。そこで，東日本旅客鉄道株式会社 E721 系電車では装置単体として冗長性を向上させた待機冗長システムを適用した。このシステムはインバータ装置，制御装置などを二重系としている。単系とした部位，二重系とした部位の選定は，故障率の計算値，また実績データを基に実施した。この補助電源装置は，通常時は二重系の部位の片側のみが運転し，もう片側は休止している。故障発生時には故障部位と休止部位が切り換わり，休止していた部位が運転を開始する。冗長性だけを考えれば完全二重化することも考えられるが，小型軽量化が強く要求される車両用電気品として最も適したシステムの一つである。

(2)　高機能

一定の電圧・周波数の交流電力を出力する補助電源装置には，架線電圧の急変や負荷として接続されるエアコンディショナ，コンプレッサなどの投入・遮断時の出力電流の急変，単相負荷のような三相不平衡負荷に対しても，波形ひずみ，電圧アンバランス，変動の少ない安定した電圧の出力が求められる。

富士電機はこれに応えるために，出力電圧制御に三相個別波形制御を採用している。制御ブロック図を**図11**に示す。この制御は三相出力電圧を検出し，各相の電圧実効値を一定に制御する三相個別実効値制御を行い，さらに負荷急変などにおける出力電圧の過渡変動を抑制するため，三相個別瞬時制御を併用した構成としている。これにより，出力電圧を高精度の正弦波に制御でき，架線電圧や負荷の急変が発生した場合にも出力電圧変動はほとんどなく，安定した電圧制御性能を実現している。また，三相電圧を各相個別に制御するため，出力に不平衡負荷が接続された場合でも三相出力電圧を平衡させることができる。

出力電圧誤差は±1％以下，波形ひずみ率は約 1％であり，高精度な正弦波電圧を実現している。

(3)　高機能 1 ボード制御装置

現在の鉄道車両用補助電源装置は，顧客の用途・ニーズが多種多様である。今回，さまざまなニーズに対応可能であり，かつ安価な制御装置を開発した。これまでは交流電

図 8　直流電車用補助電源装置 2 多重方式の主回路構成

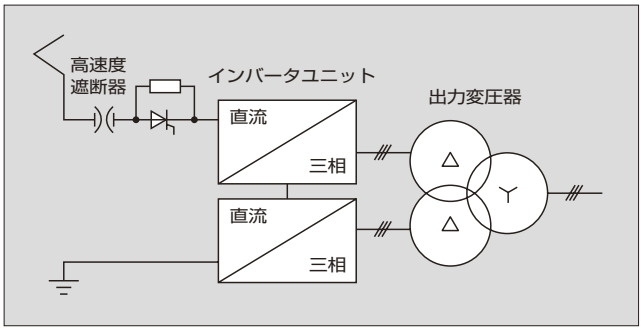



図 9　直流電車用補助電源装置インバータ 1 段方式の主回路構成

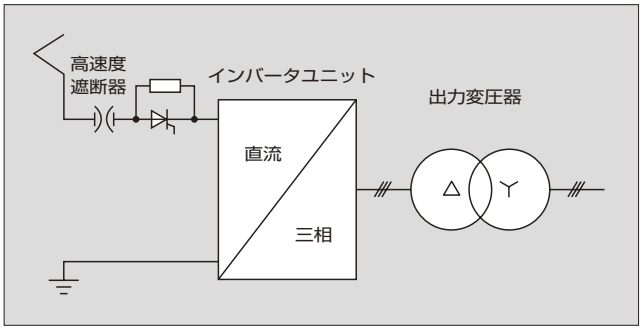



図 10　交流電車用補助電源装置の待機二重系主回路構成

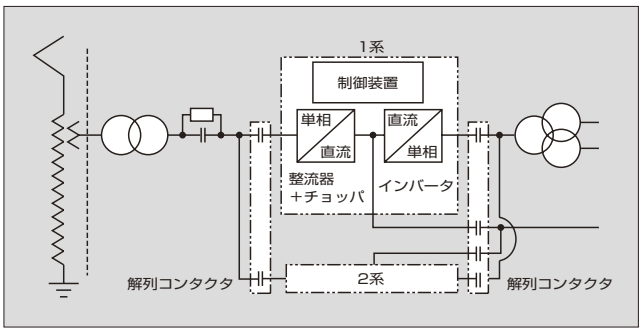
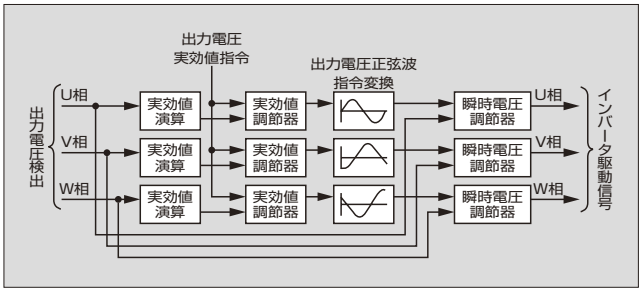



図 11　補助電源装置の制御ブロック図



車用，直流電車用とシステムに応じた制御装置を適用していたが，今回制御装置の共通化を図り，ソフトウェアの一部を変更することにより，すべての電車に対応できる制御装置とした。

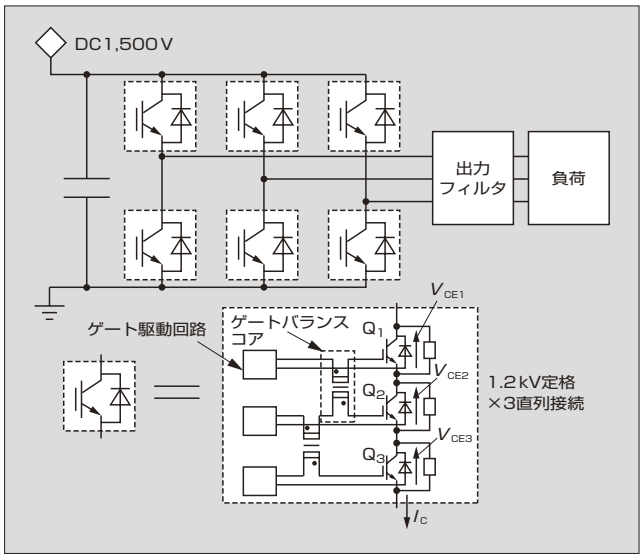
ハードウェアは 32 ビット CPU を 2 個搭載し，多岐にわたる演算処理を高速・高精度で実現可能とした。一方で制御演算，他方でシーケンス制御・モニタ機能・車上伝送機能などの処理を実行している。また，2 個の CPU 間のデータ伝送には，高速伝送可能なクロック同期式シリアル通信を用いて，直接伝送している。このように，データ通信技術，回路集積化技術を駆使し，部品点数の大幅な削減を実現させ，従来のラック・カード式からワンボードタイプとし，高信頼化を図っている。また，オプションとして，車上伝送基板，表示操作パネル基板の取付けができるように準備して複数系統の車上伝送に適用できるようにし，さまざまな顧客のニーズに対応可能としている。

制御機能としては，制御応答性，制御安定性向上を図るため，標準機能として三相個別波形制御や三相個別瞬時制御，デッドタイム補償制御などを有している。また，単相・三相 PWM インバータの制御はもちろんのこと，チョッパ制御や PWM コンバータ制御，さらには並列冗長制御や二多重構成のインバータ制御にも対応可能としている。

### 3. 4　在来線車両用補助電源装置の高性能化技術

DC1,500 V 以上に対応する補助電源装置では，スイッチング素子として 3.3 kV 耐圧の IGBT が広く用いられている。IGBT は高耐圧化するにつれてスイッチングに伴う素子発生損失が飛躍的に増加するため，キャリヤ周波数を高くすることが困難である。この制約のために，3.3 kV 耐圧 IGBT を用いた補助電源インバータのスイッチング周波数は 1 kHz 台に抑えられており，交流出力側に設けるフィルタが大きくなり，またフィルタから耳障りな電磁騒音が生じている。

図 12　IGBT 直列接続インバータの構成




このような背景のもと，富士電機は低損失，小型，低騒音を課題として，補助電源装置の技術開発に取り組んでいる。

#### 3. 4. 1　インバータの構成

低損失化・低騒音化の実現のために，富士電機は，1.2 kV 耐圧など低圧の IGBT を複数個直列に接続して一つのスイッチング素子として動作させ，高耐圧 IGBT の代わりとする技術開発に取り組んでいる。**図 12** に直流電圧 1,500 V，出力容量 170 kVA の装置適用時におけるインバータ構成を示す。このインバータでは，1.2 kV 耐圧 IGBT（Q1，Q2，Q3）を 3 直列接続して，3.3 kV 耐圧 IGBT からの置換えを図っている。1.2 kV 耐圧 IGBT は 3.3 kV 耐圧 IGBT に比べてスイッチング損失が非常に少ないので，冷却体の小型化が可能となる。また，スイッチング周波数を高めることができ，出力フィルタの大幅な小型化および低騒音化が可能となる。IGBT を直列接続したときの最大の問題点は，個々の IGBT 素子特性や周辺回路のばらつきによって，IGBT 素子のスイッチング動作にばらつきが生じるため，スイッチング動作時の素子電圧 $V_{CE1}$，$V_{CE2}$，$V_{CE3}$ がアンバランスとなり，素子印加電圧が素子耐圧を超えることである。これによって素子破壊を招く可能性があるため，スイッチングタイミングをバランスさせることが最も重要な課題となる。

この課題に対し，富士電機は**図 12** に示すように，各ゲート信号線をゲートバランスコアによって磁気的に結合し，ゲート信号を同期させる方式を開発した。

#### 3. 4. 2　インバータの性能

インバータのプロト機を用いて，性能評価を実施した。その結果について述べる。

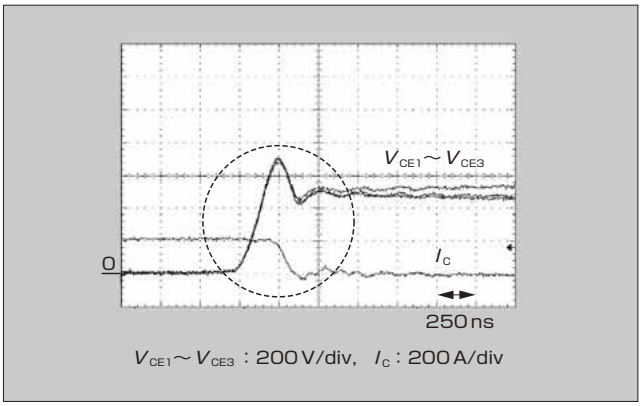
(1)　素子電圧バランス性能

**図 13** にターンオフ波形を示す。これらは，素子 3 直列分の各素子電圧 $V_{CE1}$，$V_{CE2}$，$V_{CE3}$ とコレクタ電流 $I_C$ の波形である。この結果から，素子過渡期間の素子電圧（**図 13** の破線囲み部）は非常によくバランスしていることが分かる。

(2)　素子発生損失

**図 14** に，**図 12** のインバータにおける素子 3 直列分の発生損失と，この損失から算出した IGBT チップのジャンク

図 13　ターンオフ波形



ション温度の特性を示す。ここでは比較のため，素子3直列接続の代わりに3.3kV耐圧IGBTを適用した場合の各特性も示す。これにより，高耐圧素子を直列接続した低耐圧素子に置き換えることで，低損失化が図れ，例えばキャリヤ周波数2kHzの条件では，素子発生損失を半減させることができる。よって，冷却体の体積も単純に半減できることが分かる。また，素子ジャンクション温度の最大値を125℃とすると，①の条件ではキャリヤ周波数の最大値が2kHz程度であるのに対し，②では8kHz程度まで増加することが分かる。キャリヤ周波数を2kHzから8kHzまで増加させた場合には，フィルタの体積はおよそ半分となる。

(3)　騒音測定

**図15**にキャリヤ周波数に対する出力フィルタの電磁騒音測定結果を示す。これにより，キャリヤ周波数を増加させると，2kHz時をピークとして，電磁騒音レベルが低減する傾向にあることが分かる。キャリヤ周波数を2kHzから8kHzに増加させると，電磁騒音レベルは約8dB低減でき，大幅な低騒音化が実現可能である。

図14　素子発生損失・温度特性

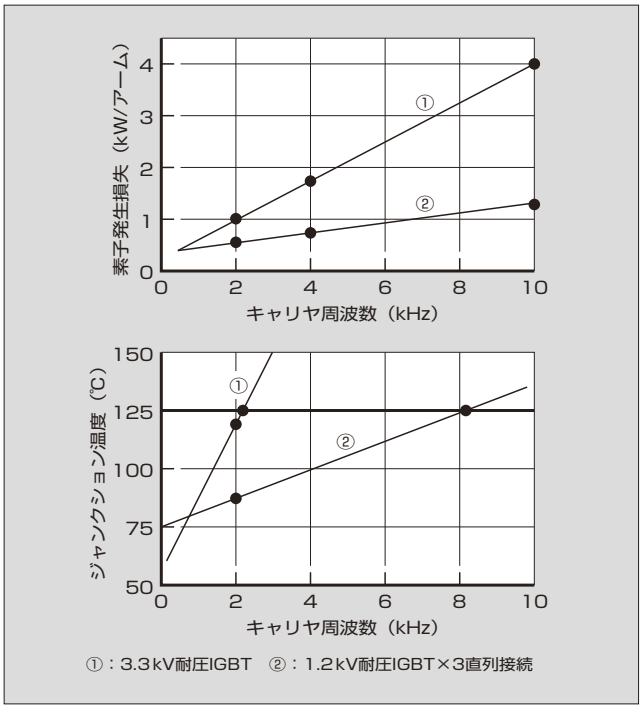
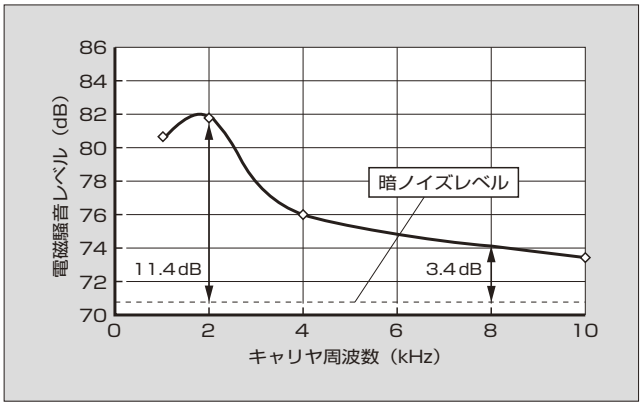



図15　出力フィルタの電磁騒音測定結果




## 4　鉄道車両分野における先進技術

鉄道車両分野では，ほかにも多くの技術開発に取り組んでいる。以下にその代表例を紹介する。

### 4.1　速度センサレスベクトル制御技術

誘導電動機のベクトル制御が車両駆動に導入され，きめ細かいトルク制御を高速で行うことが可能となった。最近では，主電動機の小型軽量，全閉化，速度センサとケーブルの削除による高信頼化，省メンテナンス，コスト低減など多くのメリットがある速度センサレス化への取組みが進んでいる。

速度センサレスベクトル制御では，**図16**に示すように，インバータ出力電圧と電動機電流から速度推定を行っている。このため，①インバータオフ時の速度推定ができない，②インバータ出力電圧の小さい低速領域では精度よく速度を推定するのが困難である，③複数台の誘導電動機を並列駆動する場合，平均速度・平均加速度しか推定できない，などの制約があり，車両駆動分野への適用においては，これらの課題を克服する必要がある。

富士電機では，高速に速度推定が可能な誘起電圧に基づく速度推定方式と速度推定誤差の少ない電流・磁束オブザーバに基づく速度推定方式とのハイブリッド方式を採用し，両方式のそれぞれの長所を生かすことで**表2**に示すと

図16　速度センサレスベクトル制御系の構成

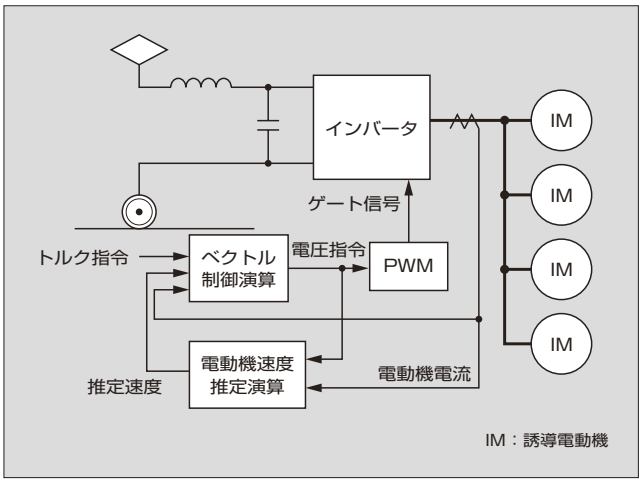



表2　速度センサレスベクトル制御方式の課題と解決方法

| 課　題 | 解決方法 |
|---|---|
| 惰行再起動時の速度推定 | 誘起電圧に基づく速度推定方式による励磁通流直後の高速・高確度速度推定 |
| 後退起動・全電気ブレーキ | 電流・磁束オブザーバに基づく速度推定方式による極低速での高精度速度推定・高精度トルク制御 |
| 複数台駆動時の空転抑制・再粘着 | オブザーバ電流・磁束，誘起電圧の変動に基づく高速・高感度加速度演算 |

おり，それらの課題解決に取り組んでいる。

### 4.2　主電動機システム

現在主流の誘導電動機は冷却用に外気を取り入れるため，内部に金属粉やじんあいが堆積（たいせき）し，かつファンや回転子バーの風切り音が大きくなる。そこで分解周期の延長によるライフサイクルコストの低減と静粛性の向上を目指して密閉型誘導電動機を開発した。

さらに高効率化・小型軽量化するために，近い将来永久磁石同期電動機駆動システムが実用化されるであろう。誘導電動機より高効率化・軽量化を図ることができるため，環境に最適合のシステムとして期待されるが，個別制御方式となることによるパワーデバイスの増加や，惰行時に電動機から誘起電圧を発生するため対策などが必要となり，これらをクリアするためにシステムの最適化による小型軽量化を研究している。

## 5　あとがき

鉄道車両におけるパワーエレクトロニクス技術について紹介した。この分野は，最先端のパワーエレクトロニクス技術とマイクロ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・快適性に加えて環境対応がますます要求されていくであろう。富士電機は市場ニーズを先取りした研究開発を積極的に推進し，今後も社会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)　森村勉，関雅樹．東海道新幹線全編成 270 km/h 化への技術の歩み（その 1）．JREA. vol.46, no.5, 2003, p.20–24.
(2)　田中守，吉江則彦．東海道・山陽新幹線直通用次世代車両 N700 系量産先行試作車の概要．JREA. vol.48, no.6, 2005, p.48–51.
(3)　萩原善泰ほか．東海道・山陽新幹線直通用次世代車両 N700 系量産先行試作車の概要（3）．R&M. 2005–8, p.4–8.
(4)　萩原善泰，福島隆文．新幹線電車用走行風冷却（ブロアおよび冷媒レス）方式主変換装置の開発．JREA. vol.48, no.10, 2005, p.45–48.
(5)　阿部康ほか．IGBT 直列接続による高圧インバータの損失低減法．平成 16 年電気学会産業応用部門大会．no.3–80．
(6)　Abe, Y. et al. A Novel Method for Loss Reduction in High-Voltage Inverters. IEEE Industry Applications Conference 40th IAS Annual Meeting. 2005, p.1849–1854.

# 自然エネルギーの発電出力安定化技術

特集

仁井　真介（にい　しんすけ）　　神通川　亨（じんつうがわ　とおる）

## 1　まえがき

2005年3月に総合資源エネルギー調査会需給部会において，「2030年のエネルギー需給展望」が答申されている。この中で，2010年度における新エネルギー導入量として，太陽光発電482万kW，風力発電300万kWなどの目標値が設定されている。これを受けて，近年，太陽光，風力などの自然エネルギーを利用した分散型電源の電力系統への連系が増加している。しかし，自然エネルギーを利用した分散型電源は，風速などの自然条件に応じて時々刻々と出力が変動するため，系統の周波数や電圧の変動を生じさせ，問題となる場合がある。

そこで，二次電池やフライホイールなどの電力貯蔵装置を用いて充放電を行うことにより，自然エネルギーを利用した分散型電源の出力変動を補償する出力安定化装置が開発されている。また，自然エネルギー発電を含む複数の分散型電源と電力貯蔵設備，ならびに不特定の負荷を接続して，マイクログリッドを構成することで，自然エネルギー発電の変動を平滑化する手法が研究されている。

本稿では，自然エネルギーの発電出力を安定化させる技術の概要を紹介する。

## 2　安定化の手段

### 2.1　自然エネルギー発電の問題点

電力系統においては発電電力と消費電力とのバランスが崩れると周波数変動が生じる。そのため，電力会社では，負荷の変動周期に応じた各種周波数制御によって，時々刻々変化する消費電力と発電電力を常にバランスさせるように発電機の出力増減の調整を実施している。数分以下の微小変動に対しては，発電機の回転数をガバナフリーで制御することにより瞬時に対応する。数分から数十分までの短周期変動に対しては，給電システムのLFC（負荷周波数制御）で発電機出力を制御することで対応する。LFCはガバナフリー制御と比較すると応答速度はやや遅いが，対応できる変動幅は大きくなる。数十分以上の長周期の変動に対してはEDC（経済負荷配分制御）で発電機の経済性を考慮した負荷配分を行っており，対応できる変動幅はさらに大きくなるが，応答速度は遅いという特徴がある。

一方，風力や太陽光など自然エネルギーを利用した分散型電源の電力系統への連系が近年増加している。これらの分散型電源は，風速，日射などの自然条件に応じて時々刻々と出力が変動するため，系統全体の周波数を変動させる要因となる可能性がある。例えば，風力発電設備においては，風速がカットアウト風速を超えた場合，風車保護のため回転を止め，これによって風力発電機の出力が最大出力からゼロ出力に大きく変化する場合がある。このような過大かつ急激な電力変動が発生した場合，EDCでの制御は困難であり（EDCは対応できる変動幅は大きいが応答速度は遅いため，ゆっくりとした変動にしか対応できない），EDCで対応できない電力変動はLFCおよびガバナフリーで対応することになる。しかし，LFCおよびガバナフリーは周波数調整容量が少ないため，変動量によっては，周波数を系統運用目標値内に保つことが困難となる可能性が懸念される。

これに対し，自然エネルギー発電による発生電力を電力貯蔵装置からの充放電電力と合成して平滑化し，自然エネルギー発電を連系しても系統周波数への影響を小さくできる出力安定化装置が開発されている。

### 2.2　出力安定化装置の原理

変動する発電出力を安定化させるためには，変動分と逆位相の電力を連系点に注入し，電力を合成する。すなわち，変動電源の発電出力が増加した場合には，電力貯蔵装置の放電電力を減少または充電電力を増大させる。一方，変動電源の発電出力が減少した場合には，電力貯蔵装置の充電電力を減少または放電電力を増大させる。これにより，変動電源と電力貯蔵装置の連系点の電力変動が補償され，平滑化された出力が得られる。**図1**に構成を示す。

この補償を行うために，一般には発電機の変動に応じた電力を出力できる電力貯蔵装置が用いられる。電力貯蔵装置は，電力貯蔵要素（二次電池，フライホイール，電気二

**仁井　真介**

分散型エネルギーシステムのエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社e-ソリューション本部エネルギーソリューション統括部エネルギーシステム部担当部長。電気学会会員。

**神通川　亨**

電力システムのシミュレーション・制御・解析に関する研究・開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部技術開発統括室。電気学会会員。

図 1　出力安定化装置の原理図

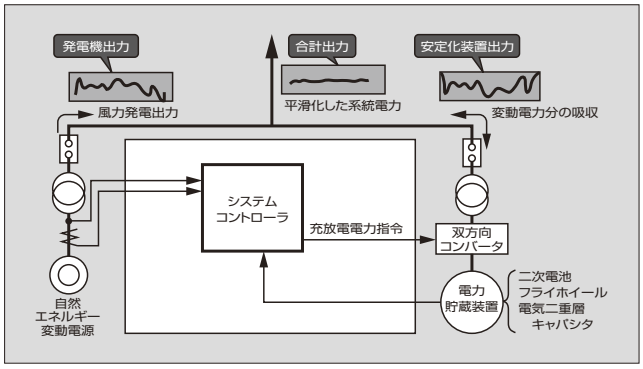
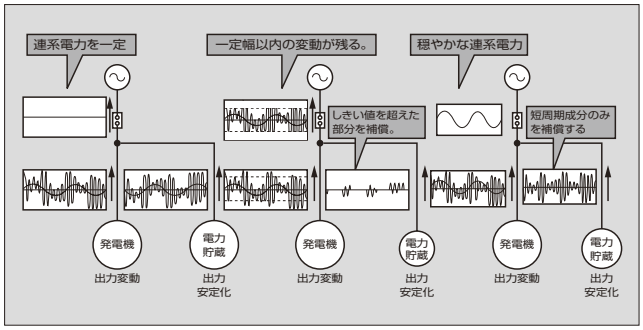



図 2　補償方法と電力貯蔵容量




重層キャパシタなど）と系統連系用の電力変換装置で構成される。変動分の補償は，系統連系点での変動をできるだけ小さくする目的で行われる。

電力安定化方式の一つにフラット運転がある。この場合，（風力）発電事業者は各時間帯の発電電力目標値を電力会社に事前通告する。フラット運転では連系点電力が事前通告した発電電力目標値を保つように電力の補償を行う。しかし連系点電力が一定となるよう，風力発電出力の変動を補償するためには電力貯蔵装置の容量を大きくしなければならない。

一方，変動量の大きい時間帯のみを補償する方式も考えられる。この場合，あるしきい値を超えた電力変動に対してのみ補償を行えばよいため，電力貯蔵容量は小さくて済む。例えば，LFC の周波数調整容量に影響するような過大な電力変動に対してのみ補償を行うといったことが可能である。しかし，しきい値以下の電力変動は残ってしまう。

基本的に電力貯蔵量と発電電力の電力品質はトレードオフの関係にあり，補償量が大きいほど電力品質はよくなり，補償量が小さいと品質の改善は小さい。できるだけ電力貯蔵容量を小さくしつつ，系統への影響を小さくする方法として平滑化運転がある。これは変動分の中の短周期成分のみを抽出して補償する方法であり，連系点には大きく緩やかに変化する変動分（長周期成分）だけが残る。なお，緩やかであれば比較的大きな変動にも EDC あるいは LFC で対応可能であり，電力品質が問題となることはない。またフラット運転と比べ，少ない電力貯蔵装置の容量で系統への影響を最小限にできる。

表 1　各種エネルギー貯蔵方式の比較

| | 二次電池 | キャパシタ | フライホイール |
|---|---|---|---|
| 種　類 | 鉛・NAS・NiH など | 電気二重層 電解コンデンサ | フライホイール |
| 基本構成 | 蓄電池直列接続 | キャパシタ直列接続 | はずみ車＋発電機 |
| 放電時間 電圧変動 温度特性 | 1分～1時間程度 中 低温で特性低下 | 0.3～1秒程度 大 特性変化少ない | 1～10秒程度 小 特性変化少ない |
| 回復時間 | 10時間 | 1～数分 | 数分 |
| 寿　命 | 5～7年（25℃） | 10年（40℃） | 15～20年 |
| 設置場所の規制 | 火災予防条例 | 一般電気室 | 一般電気室 |
| 環境性 | ○水素ガスの発生 あり ○鉛など廃棄処理 が必要 | ○有害ガスの発生 なし ○一般廃棄物 | ○有害ガスの発生 なし ○一般廃棄物 |
| 騒　音 | − | − | 70～75 dB |
| 信頼性 | ◎ | ◎ | △（実績少） |
| 蓄電量の把握 | 電圧（非線形： 正確な把握困難） | 電圧（2乗に比例） | 回転数 （2乗に比例） |
| 繰返し頻度（寿命） | 短周期繰返し困難 （特性劣化あり） | 短周期繰返し可能 （特性劣化あり） | 短周期繰返し可能 （特性劣化なし） |

出典：電気協同研究．vol.56, no.4, 2000.

**図 2** に補償方法と電力貯蔵容量の関係を示す。貯蔵容量の大小は円の大きさで示している。また以降は，平滑化運転方式を行う場合の電力安定化装置について述べる。

### 2. 3　電力貯蔵装置

電力貯蔵装置は，一般に二次電池，フライホイール，電気二重層キャパシタなどのエネルギー蓄積装置と系統連系用変換装置で構成される。

主要なエネルギー貯蔵方式の比較を**表 1** に示す。二次電池および電気二重層キャパシタは電気エネルギーを蓄積し，フライホイールは機械の回転エネルギーを蓄積する。

二次電池は，高サイクル充放電に制約があるため放電深度の考慮などによる長寿命化対策を行う必要があるが，短周期（数秒から数分まで）および長周期（数分から数時間まで）の変動抑制に適している。

電気二重層キャパシタは，補機が不要で短周期繰返しが可能であるという特徴を有する。ただし，エネルギー密度が低いため大容量化が困難であるので，微小変動分（数秒以下）の抑制に適している。

フライホイールには，高速フライホイールと超高速フライホイールがある。フライホイールは，回転数の 2 乗に比例する回転エネルギーを蓄積する。このため，回転数が高いほど小型化でき，超高速フライホイールでは数万回転/分の回転数で運転される。フライホイールは充放電サイクルによる制約がほとんどないが，エネルギー蓄積量に制約があるため微小変動分の抑制に適する。

系統連系用変換装置は，システムコントローラからの指令を受けて双方向コンバータによりエネルギー蓄積装置の充放電を行う。キャパシタなどの直流電圧の変動範囲が大

特集

きいエネルギー蓄積装置では，直流電圧が低下した場合でも定格出力を確保するために，大きな電流を流す必要がある。このため，定格容量の大きなコンバータを選定する必要がある。したがって，エネルギー蓄積装置の種類によってはチョッパを挿入して直流電圧を制御し，直流電圧を一定にするほうが経済的に有利となる場合があり，検討を要する。

電力安定化装置では充放電を随時行うため，エネルギー蓄積装置のエネルギー残量を監視・制御する必要がある。すなわち，常時充放電を可能とするためには，蓄積されるエネルギー量を半分程度に制御し，充電方向へも放電方向へも動作が可能な状態にする必要がある。そのために，蓄積エネルギーの残量管理が必要となる。

電気二重層キャパシタの残存エネルギーは，電圧の２乗に比例するので，電圧の計測によりほぼ正確に残量を把握できる。また，フライホイールは回転数の２乗に比例するので，回転数の検出によりほぼ正確に把握できる。一方，蓄電池は電圧と残存エネルギーの関係が非線形であり，使用条件により変化するため正確な把握が困難である。したがって，いったん満充電か放電終止の状態を作り，その後の電流値の累積で残量を推定するか，残量を管理する電圧値に幅を持たせ，余裕ある運用をするなどの工夫を凝らしている。

図３　風力発電安定化装置制御ブロックの例

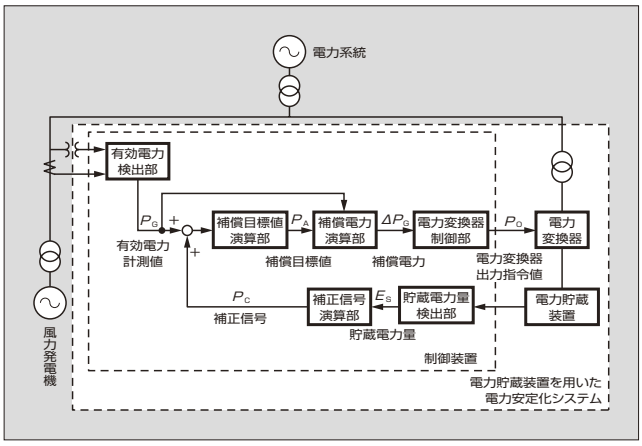
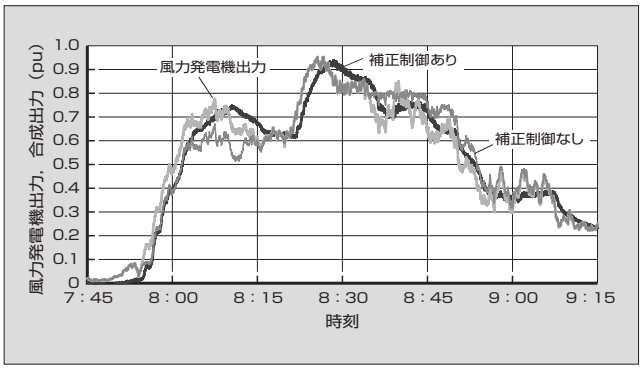



図４　各種補正制御の有無による補償結果の比較




## 3　各種安定化技術

### 3.1　風力発電安定化装置

二次電池やフライホイールなどの電力貯蔵装置を用いて，充放電を行うことにより，出力変動，負荷変動，潮流変動などの電力変動分を補償することが可能であるが，ここでは風力発電機の出力安定化を目的としたシステムを採り上げる。エネルギー蓄積装置の容量は有限であり，なおかつ運転許容範囲が存在する。このため，運転許容範囲を逸脱すると，例えば二次電池では過充電・過放電による電池寿命の低下，フライホイールでは回転数オーバーによる装置の停止や回転数不足による運転の不安定化につながる。また，電力貯蔵量が上限あるいは下限に達するとそれ以上の電力補償ができなくなる。このため，風力発電の出力変動を安定化するための充放電制御のほかに，適切な電力貯蔵量を確保するために各種補正制御が行われる。**図３**に制御ブロックの例を示す。**図３**では補正制御の例として，電力貯蔵量に応じて補正信号を加算する手法を示す（補正信号を加算し，充放電電力を充電方向，あるいは放電方向にシフトすることで適切な電力貯蔵量を確保する）。そのほかにも電力変動量に応じて補償目標値演算部の平滑化フィルタ時定数を可変制御する手法などがある（平滑化フィルタ時定数を連続的に変化させ，補償周波数帯域を調整することで適切な電力貯蔵量を確保する）。

補正制御なしの場合，風車の立上り時，大きな補償を行い電力貯蔵量が上限に達してしまうために，以後の補償ができなくなるなどの不具合が発生する。これに対し，各種補正制御ありの場合は，電力貯蔵量が上下限値に達しないように制御を行うことで，補償動作を継続できる。**図４**に，各種補正制御の有無による補償結果の違いを，シミュレーション結果により示す。図中，補正制御なしの場合は，風車立上り時にエネルギー蓄積装置の補償容量を使い切っているために，立上り後（8：03 以降）平滑化ができていない。一方，補正制御ありの場合は立上り中に補償量を制御

図５　ハイブリッド安定化システム

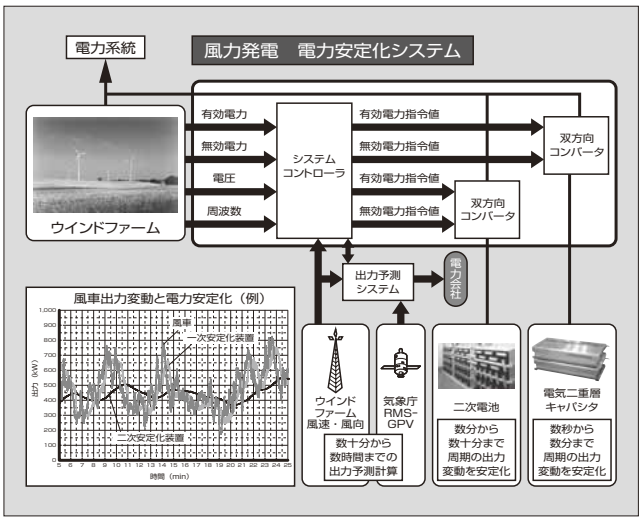
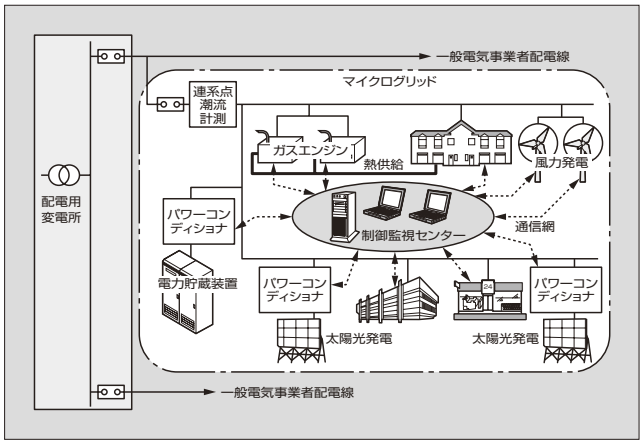


図 6　マイクログリッド概念図




し補償容量を残しているため，立上り後も平滑化を持続している。

### 3.2　ハイブリッド出力安定化装置

数秒から数分までの補償は，主として LFC に対する対策となるが，系統への連系条件として，EDC の制御領域である長時間の変動に対する補償が必要な場合がある。短時間の変動と長時間の変動を補償する方式として，**図 5** に示すようなハイブリッド方式が用いられる。これは，数秒から数分までの短周期成分は，電気二重層キャパシタあるいはフライホイールなどにより補償し，数分から数時間までの長周期成分は鉛蓄電池や Ni-H 電池などで補償する。長周期補償に関しては，将来気象情報を考慮したシステムとすることで，電池容量のさらなる適正化が期待できる。

### 3.3　マイクログリッド

マイクログリッドは**図 6** に示すように，一般に分散型電源と負荷および電力貯蔵装置を接続した小さい系統であり，IT により発電機，負荷の情報をリアルタイムで計測し，グリッド全体を高速に制御する。分散型電源には自然エネルギー発電が含まれるが，グリッド全体の需給調整を行うことにより，自然エネルギーの変動分を吸収して，系統連系点での潮流を安定化させることが可能である。

マイクログリッドでは，グリッド内の発電量と負荷量を短時間間隔で調整して需給バランスをとる制御（同時同量制御）が行われる。自然エネルギー発電変動分の中の長周期成分と負荷変動分は，主としてガスエンジンなどの出力制御可能な電源で補償し，自然エネルギー発電変動分の中の短周期成分や負荷の急変分は電力貯蔵装置で補償する。これにより，連系点電力を零あるいは一定にすることを可能としている。

## 4　あとがき

自然エネルギー発電は，地球温暖化防止対策として期待されている反面，電力系統にとっては不安定で扱いにくい電源である。その欠点を補う手段として，出力安定化装置やマイクログリッドが有効であり，本稿では，それらの電力安定化技術について述べた。地球温暖化問題への対応は，国家レベルの施策として展開されているが，自然エネルギー導入促進による 2010 年度導入目標の達成は，重要な課題となっている。

富士電機では，発電出力安定化技術により自然エネルギーの導入が促進されることを期待しており，発電出力安定化の核となる出力安定化装置について，現在，電池メーカーなどと共同で実証研究を推進中である。

今後とも出力安定化技術の開発を推進し，自然エネルギーの導入促進に寄与していく所存である。

### 参考文献

(1)　矢後賢次，腰一昭．風力発電の系統連系システム．富士時報．vol.78, no.6, 2005, p.439-445.
(2)　伊原木永二朗ほか．分散型エネルギーシステムを支える技術．富士時報．vol.78, no.6, 2005, p.423-430.
(3)　高野富裕．自然エネルギー発電と電力貯蔵技術．電気学会論文誌 B．vol.126, no.9, 2006.
(4)　総合資源エネルギー調査会需給部会．2030 年のエネルギー需給展望．2005-3.

# 上下水道プラントのエネルギーマネジメントとパワーエレクトロニクス技術

特集

長倉　善則（ながくら　よしのり）　安久津 信也（あくつ　しんや）　山本 総一郎（やまもと　そういちろう）

## 1　まえがき

1997 年 12 月の京都議定書の採択に始まった地球温暖化防止の取組みは，二酸化炭素（$CO_2$）排出量の削減から窒素酸化物（$NO_x$），硫黄酸化物（$SO_x$），環境ホルモンなど有害物質の抑制，地球環境保全への取組みに拡大してきている。

2006 年 4 月に「エネルギーの使用の合理化に関する法律の一部を改正する法律」（改正省エネ法）が施行されてから，上下水道事業体においても電気負荷と熱負荷の合計値でエネルギー管理レベルが設定され，さらに $CO_2$ 排出原単位の計画的縮減を要求される中で，ますます環境負荷を低減した事業所運営が求められている。上下水道事業体に環境 ISO 取得，大規模太陽光発電など自然エネルギー導入の動きが広がっているのもこのような社会情勢による。

社会インフラの基盤である上下水道事業ではエネルギーの有効利用（未利用，省エネルギー）のほか，施設の安定稼動のための電源品質の維持も重要であり，$CO_2$ 排出原単位が少なく従量料金の安価な夜間電力を利用し，停電時には非常用発電設備として機能する電力貯蔵システムの導入も活発化している。

上下水道プラントで使用するエネルギーと包蔵するエネルギーを効率よく利用するためにはエネルギーマネジメントが重要であり，その実現手段としてパワーエレクトロニクス技術を駆使した製品がその課題を解決する重要な構成要素となる。

本稿では，上下水道プラントにおけるエネルギーマネジメントの現状と関連する最近のパワーエレクトロニクス技術について紹介する。

## 2　上下水道プラントのエネルギーマネジメント

上下水道プラントが包蔵するエネルギーとしてまず挙げられるのは，水の位置エネルギーと熱エネルギーである。

位置エネルギーは取水地点と受水地点間の有効落差として，熱エネルギーは年間を通じてほぼ一定である下水と冷媒に接触する外気などとの温度差として存在する。

また，下水中のメタンなど水に含まれる物質のエネルギーや施設に注がれる日射，風などのエネルギーも有効に利用できる可能性を持っている。

一方，上下水道プラントが利用するエネルギーの大部分は電気エネルギーで大半が水や空気の輸送に使用されるため，エネルギー排出原単位の削減を検討するうえでポンプ，ブロワなどの流体機械が主要な省エネルギーの対象設備となり，場合によっては大きい省エネルギー効果が得られる。

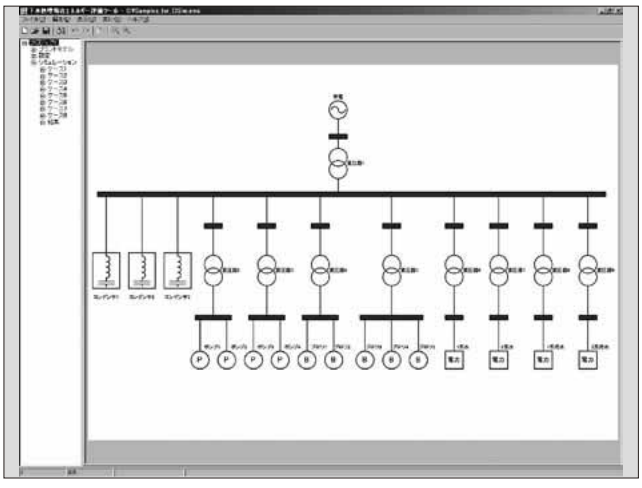
上下水道プラントのエネルギーマネジメントは，以上述べた施設が包蔵するエネルギーを有効に利用し，省エネルギーとあいまって化石燃料由来のエネルギーの消費量をいかに低減するか，さらにこれらのエネルギー源を相互にかつ電力系統と安定的に連系させて，電源の品質をいかに維持していくかをマネジメントすることといえる。

ここでは，電力原単位削減のエネルギーマネジメントに有効な省エネルギー評価シミュレータの機能とシミュレーション結果を紹介する。

### 2.1　省エネルギー評価シミュレータ[1]

このシミュレータは以下に示す負荷および電源の部品モ

図 1　電力系統の模擬回路作成画面例



**長倉　善則**

上下水道用電気・計装システムの設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社環境システム本部水処理統括部機電技術部長。電気学会会員。

**安久津 信也**

上下水道用電気・計装システムの設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社環境システム本部水処理統括部 GENESEED 技術部。

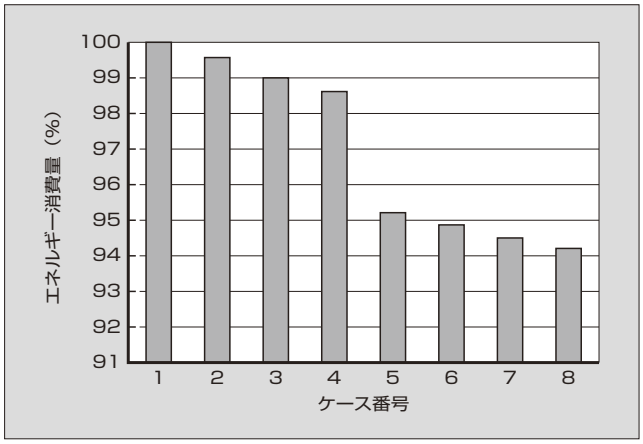
**山本 総一郎**

上下水道用電気・計装システムの設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社環境システム本部水処理統括部副統括部長。電気学会会員。

表1　省エネルギー項目の組合せとシミュレーションケース番号

| ケース | 変圧器 | コンデンサ | ポンプ |
|---|---|---|---|
| 1 | 標準モルトラ | なし | 吐出し弁制御 |
| 2 | 高効率モルトラ | なし | 吐出し弁制御 |
| 3 | 標準モルトラ | あり | 吐出し弁制御 |
| 4 | 高効率モルトラ | あり | 吐出し弁制御 |
| 5 | 標準モルトラ | なし | 回転速度制御 |
| 6 | 高効率モルトラ | なし | 回転速度制御 |
| 7 | 標準モルトラ | あり | 回転速度制御 |
| 8 | 高効率モルトラ | あり | 回転速度制御 |

図2　1か月のエネルギー消費量比較




デルを持ち，GUI（Graphical User Interface）機能により検討対象の上下水道プラントの電力系統を模擬することができる。

**図1**に模擬した上下水道プラントの電力系統の例を示す。模擬できる部品は以下のとおりとなっている。

(1)　ポンプ
　○吐出し弁制御
　○回転速度制御による圧力一定制御
　○吐出し弁制御とインバータ制御の混在
(2)　ブロワ
(3)　太陽光発電
(4)　発電機（同期発電機，誘導発電機）
(5)　電力貯蔵設備
(6)　変圧器

### 2.2　シミュレーション結果

**図1**の電力系統において変圧器を高効率形にした場合，コンデンサによる力率改善を実施した場合，ポンプを回転速度制御した場合を省エネルギー対策項目としてシミュレーションしたケースを**表1**に示す。また，組合せのケースごとにエネルギー消費量をシミュレーションにて求めた結果を**図2**に示す。

このケースでは，変圧器の高効率化で0.4％，力率改善で1％，可変速制御で4.7％の省エネルギーとなる結果が得られた。毎年1％の電力原単位の削減を計画する場合，投資額が少なく効果の高い順に実施することとなるが，この場合，初年度で力率改善，その後5年間で変圧器の高効率化と可変速制御の導入を行えば，6年のエネルギー原単位の削減が可能であることが分かる。投資対効果が明確になれば，設備導入のための住民説明にも有用と考えられる。

## 3　パワーエレクトロニクス技術

### 3.1　省エネルギー機器

電圧形VVVF（Variable Voltage Variable Frequency）は，パワートランジスタの普及により堅牢（けんろう）で保守が容易なかご形誘導電動機を回路構成が簡素で安価な周波数変換で駆動する装置として，電流形VVVFやサイリスタセルビウスに替わって導入が開始された。

その後，パワートランジスタの高耐圧化・大電流化に伴って大容量化が進んだことと，PWM（Pulse Width Modulation）コンバータや入力変圧器多巻線化，コンバータのマルチレベル化など高調波抑制対策が可能となったことで，現在，ポンプやブロワの可変速制御装置の主流となり，上下水道プラントの主要機器の有効な省エネルギー手段となっている。今後もさらに高電圧化と，変換装置および電動機の高効率化が進むものと考えられ，変換装置の高効率化としてマトリックスコンバータ，高耐圧化として高圧ダイレクトVVVF，電動機の高効率化としてPM（Permanent Magnet）モータの例を述べる。

(1)　マトリックスコンバータ[2]

富士電機では，低圧VVVFの効率向上とコンパクト化を狙ってAC-AC直接変換方式のマトリックスコンバータを製品化している。

従来のマトリックスコンバータが出力可能な正弦波電圧の最大値は入力電圧の86.6％で，標準電圧の電動機を駆動する場合には過変調領域で生じる低周波のトルク脈動と入出力電流のひずみの増大を抑制することが必要となる。これは，マトリックスコンバータが入力電源電圧を直接変換するため，過変調領域で特定のスイッチのオン状態が継続することによって発生する。

この対策にビートレス制御[3]を採用したマトリックスコンバータを開発した。この製品は電圧形VVVFに対し，入力電流ひずみ率が若干増加するものの，変換効率を10％向上でき，標準電圧の電動機を駆動できることが特徴である。

(2)　高圧ダイレクトVVVF

高圧ダイレクトVVVFは，多相化した入力変圧器から各相を絶縁された複数の単相インバータで切り出し，出力側で直列接続して電動機に直接高圧電力を供給する方式である。入力変圧器の多相化で電源高調波をガイドライン以下に，3レベルの単相インバータを2直列ないし4直列とすることで出力電圧レベルを9レベルないし17レベル相当とし，入出力電流を正弦波に近づけた電源と電動機に優しいインバータとなっている。

さらに上下水道プラントの既設誘導電動機用可変速制御

装置の更新需要にも適用できるように，出力電圧リプルを定格電圧の10％以内に抑えた低リプル機能，100％速度に到達した後にVVVFをバイパスして商用電源に切り換える同期切換機能をオプション設定した仕様としている。

高圧ダイレクトVVVFの仕様を**表2**に示す。

(3)　PMモータ

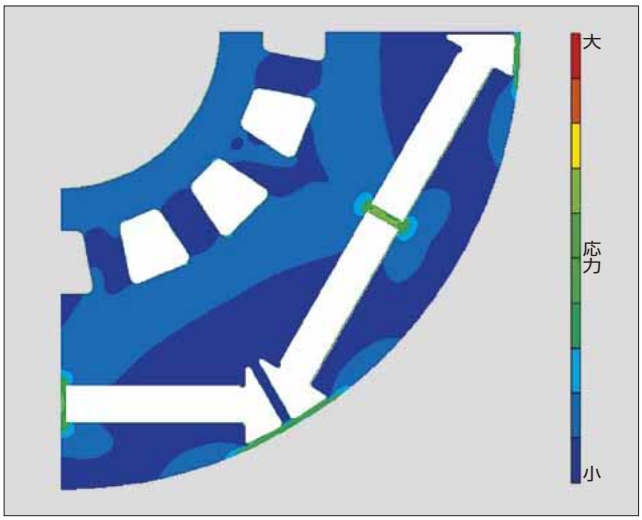
上下水道プラントの汚泥処理設備で使われる遠心分離機は，省エネルギーのほか慣性モーメントを低減する小型化や回転速度制御装置も含めた低価格化への要求が強い。

PMモータは回転子に永久磁石を用いて回転子の損失（負荷損失と励磁損失）をなくし高効率化とコンパクト化が可能である。開発したPMモータは，磁気回路と回転子強度などの最適化設計を行うことで，誘導電動機に比べ効率を2％向上，質量を40％低減，体積を50％低減した（214kW機の場合）。回転子強度解析例を**図3**に，磁束密度解析例を**図4**に示す。また，PMモータは回転子に励磁回路を持たないため力率もよく，入力電流を17％低減でき，適用する回転速度制御装置を小型化できる。**表3**に遠心分離機用PMモータの概略仕様を示す。

表2　高圧ダイレクトVVVFの仕様

| 仕様項目 | | 3.3kVクラス | 6.6kVクラス |
|---|---|---|---|
| 出力容量範囲 | | 280～3,750kVA | 560～7,500kVA |
| 適用電動機出力 | | 225～3,200kW | 450～6,400kW |
| 入　力 | 電　圧 | 3.3kV±10％　三相 | 6.6kV±10％　三相 |
| | 周波数 | 50/60Hz±5％ | |
| 出　力 | 電　圧 | 3.3kV　三相 | 6.6kV　三相 |
| | 周波数 | 0.2～60Hz　分解能　0.1Hz | |
| コンバータ | | 36相ダイオードコンバータ | |
| インバータ | | マルチレベルインバータ直列接続PWM制御 | |
| 回転速度制御方式 | | 簡易センサレスベクトル制御付V/f一定制御<br>精度：±0.5％ | |
| 効　率 | | 約97％ | |
| 力　率 | | 95％以上 | |
| 瞬停保護時限 | | 200ms | |
| 入力電流高調波含有率 | | ガイドライン以下 | |
| 盤構造 | | 屋内自立閉鎖形（IP20） | |
| 冷却方式 | | 強制風冷 | |
| オプション機能など | | | |
| | 絶縁耐力 | 3号A・B対応 | 6号A・B対応 |
| | 瞬停保護時限延長 | 500msまで | |
| | 出力サージ電圧抑制 | ピーク電圧を定格の10％以下に抑制 | |
| | 投入・解列機能 | 商用↔インバータの同期切換 | |

図3　PMモータの回転子強度解析例




### 3.2　電力変換機器

上下水道プラントにおいて電源の供給信頼性を阻害する要因の一つは停電で，電力系統への雷撃により避雷器が動作する際に生ずる0.5秒以下の瞬時電圧低下から地震，台風などによる配電網の損壊が原因の数日間の長期停電までである。

また，最近の制御回路には小型のCPUを内蔵する制御機器が導入されIT化されてきており，電圧の変動が制御動作に影響を与え，設備の稼動に影響を与える可能性も増大してきている。

さらに分散化電源の普及が進めば，特に太陽光発電設備や風力発電設備のように天候により変動するものは系統の電力品質維持の阻害要因となる可能性もあり，これらの影響を極力抑制し，施設の安定的運転を確保することがます

図4　PMモータの磁束密度解析例

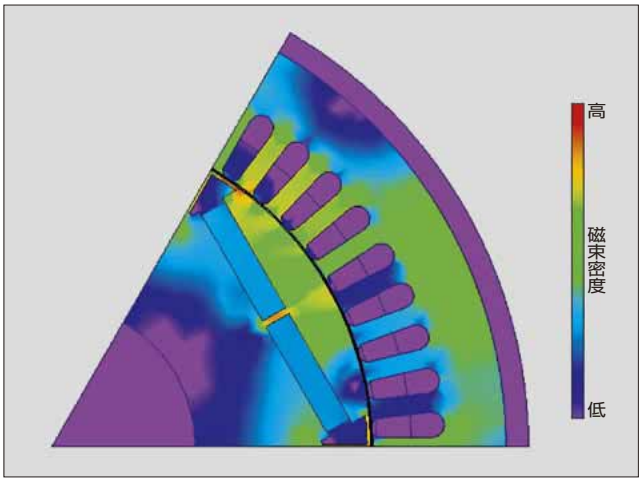



表3　PMモータの概略仕様

| 項　目 | 仕　様 |
|---|---|
| 回転子形状 | 磁石埋込み式（IPM） |
| 出力範囲 | 90～500kW |
| 回転速度 | 1,800r/min，1,500r/min，1,200r/min |
| 電　圧 | 200V級（90kW以下），400V級 |
| 過負荷耐量 | 150％　1分間 |
| 保護方式 | IP44（全閉防まつ形） |
| 冷却方式 | IC416（外被表面冷却・他力形） |
| 絶縁種別 | F種 |

図 5　電力貯蔵のシステム構成

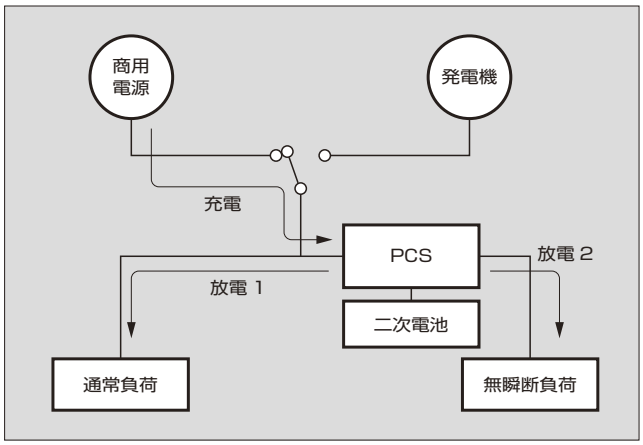



表 4　PCSの仕様例

| 項　目 | | | 仕　様 |
|---|---|---|---|
| 変換方式 | | | 自励電圧形高周波PWM |
| 冷却方式 | | | 強制空冷 |
| 直流入出力 | 充　電 | 電力 | 0～500kW |
| | | 電圧 | 580～755V |
| | 放　電 | 電力 | 0～538kW |
| | | 電圧 | 490～660V |
| 交流入出力 | 電　力 | 充電 | 400V，600kW |
| | | 放電 | 400V，500kW |
| | 電圧変動範囲 | 連系 | ±10% |
| | | 自立 | ±2% |
| | 周波数変動範囲 | 連系 | ±1% |
| | | 自立 | ±0.1% |
| | 高調波含有率 | | 総合5%，各次3%以下 |
| | 波形ひずみ率 | | 3%以内 |
| | 力　率 | | 95%以上 |
| 変換効率 | | | 93%以上 |
| 切換時間 | | | 20ms以内 |

ます重要となっている。

ここでは，長時間の電力品質補償装置の例としてナトリウム–硫黄（NAS）電池やサイクル寿命を向上させた鉛電池を二次電池として使う電力貯蔵装置について紹介する。

二次電池を用いた電力貯蔵装置は**図 5** に示すシステム構成で，通常時には PCS（Power Conditioning System）を介して連系運転を行って二次電池に電力を貯蔵するとともに，エネルギーの一部を受電電力のピークカットに使用し，良品質の電力を負荷に供給する機能を持っている（放電 1，放電 2）。また，いったん停電となれば，即時に PCS を商用系統から解列して自立運転に入り，無瞬断で二次電池に貯蔵していたエネルギーで電力供給を継続することができ（放電 2），復電時も商用電源と同期を取りながら連系運転に無瞬断で復帰できる。

図 6　停電・復電時の PCS 入出力電圧波形

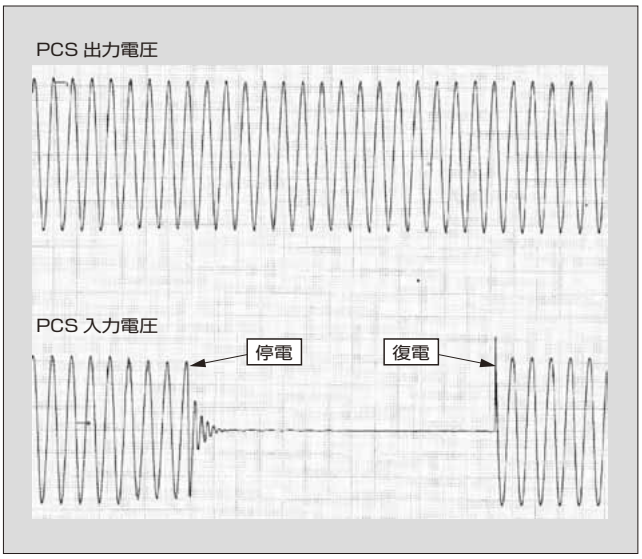



**表 4** に PCS の仕様例，**図 6** に停電・復電時の PCS 入出力電圧波形を示す。

二次電池はサイクル放電に適し大容量化が容易な NAS 電池が主に用いられているが，サイクル放電用鉛蓄電池は小容量電力補償用，リチウムイオン電池，ニッケルメタルハイドライド電池は分オーダー，電気二重層キャパシタは百分の 1 秒オーダーの瞬時電圧低下補償用といった二次電池の充放電特性や補償時間適性に合わせた電力貯蔵システムを構成することも可能である。

現在開発中の発電機との連系，さらに無効電力や高調波電流などへの補償対象の拡大により，多様な電力品質補償に適用することができる。

## 4　あとがき

本稿では上下水道事業体の省エネルギーに関し，エネルギーマネジメントとパワーエレクトロニクス技術について紹介した。省エネルギー，環境負荷低減への取組みは今後ますます重要になっていくことが考えられ，富士電機もこれらの課題に応えることで，環境負荷低減に寄与していく所存である。

**参考文献**

(1)　小林憲徳ほか．「GENESEED solution」省エネルギーシミュレータ．富士時報．vol.79, no.6, 2006, p.477–480.
(2)　山田達也，佐藤和久．マトリックスコンバータ（FRENIC–MX）の開発．電機．2006–8. p.30–31.
(3)　玉井康寛ほか．マトリックスコンバータの過変調領域における一制御手法．平成 18 年電気学会産業応用部門大会論文誌．PpI–79–84.

## 主要営業品目

### 富士電機システムズ株式会社

情報・通信・制御システム，水処理・計測システム，電力システム，放射線管理システム，FA・物流システム，環境システム，電動力応用システム，産業用電源，車両用電機品，クリーンルーム設備，レーザ機器，ビジョン機器，電力量計，変電システム，火力機器，水力機器，原子力機器，省エネルギーシステム，新エネルギーシステム，UPS，ミニUPS

### 富士電機機器制御株式会社

電磁開閉器，操作表示機器，制御リレー，タイマ，ガス関連機器，配線用遮断器，漏電遮断器，限流ヒューズ，高圧受配電機器，電力制御機器，電力監視機器，交流電力調整器，検出用スイッチ，プログラマブルコントローラ，プログラマブル操作表示器，ネットワーク機器，インダクションモータ，同期モータ，ギヤードモータ，ブレーキモータ，ファン，クーラントポンプ，ブロワ，汎用インバータ，サーボシステム，加熱用インバータ

### 富士電機デバイステクノロジー株式会社

磁気記録媒体，パワートランジスタ，パワーモジュール，スマートパワーデバイス，整流ダイオード，モノリシックIC，ハイブリッドIC，半導体センサ，サージアブソーバ，感光体，画像周辺機器

### 富士電機リテイルシステムズ株式会社

自動販売機，コインメカニズム，紙幣識別装置，貨幣処理システム，飲料ディスペンサ，自動給茶機，冷凍冷蔵ショーケース，カードシステム

＊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。


| | | |
|---|---|---|
| **富士時報** | **第 80 巻　第 2 号** | 平成 19 年 2 月 28 日　印刷<br>平成 19 年 3 月 10 日　発行<br>定価 735 円（本体 700 円・送料別） |
| 編集兼発行人 | 原嶋孝一 | |
| 発行所 | 富士電機ホールディングス株式会社<br>技術企画部 | 〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目 11 番 2 号<br>（ゲートシティ大崎イーストタワー） |
| 編集室 | 富士電機情報サービス株式会社内<br>「富士時報」編集室 | 〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号<br>（新宿コヤマビル）<br>電話（03）5388－7826<br>FAX（03）5388－7988 |
| 印刷所 | 富士電機情報サービス株式会社 | 〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号<br>（新宿コヤマビル）<br>電話（03）5388－8241 |
| 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<br>電話（03）3233－0641<br>振替口座 東京 6－20018 |


© 2007 Fuji Electric Holdings Co., Ltd., Printed in Japan（禁無断転載）

# 富士時報論文抄録

## 産業用パワーエレクトロニクスの現状と展望

川村　逸生　　笹川　清明
富士時報　Vol.80 No.2 p.100–105（2007）

パワーエレクトロニクス機器は，社会の広い分野で活躍している。用途，容量とも幅広く，情報機器用電源，無停電電源，圧延機用インバータ，アルミ精錬用整流器など多岐にわたっている。本稿では，このように多様で部品の共通化が困難なパワーエレクトロニクス機器を，少ない経営資源で効率よく開発するための設計手法と設計ツールの概要を紹介するとともに，パワーエレクトロニクス機器が使われるプラントやコンポーネントの市場動向とそれに対する富士電機の取組みについて述べる。

## パワーエレクトロニクス装置設計の高度化技術

滝沢　聡毅　　徳田　寛和
富士時報　Vol.80 No.2 p.106–109（2007）

無停電電源装置や可変速駆動用インバータなどのパワーエレクトロニクス製品には，小型化・高効率化・高性能化・高信頼化の要望が強い。また製品サイクルも早まりつつあり，タイムリーに製品を発売することが必要となっている。そのため製品開発には，スピーディかつ精度を有した設計技術力が必要不可欠となる。本稿では，上記設計技術の中で，パワーエレクトロニクス装置における IGBT モジュールの熱設計と，制御ソフトウェア設計をサポートするツールについて紹介する。

## 鉄道車両・産業向けインバータの高性能化技術

阿部　康　　田畑　壮章　　松原　邦夫
富士時報　Vol.80 No.2 p.110–113（2007）

近年，IGBT の高耐圧化が進み，サイリスタと同様な定格電圧を持つ高耐圧 IGBT が製品化されている。これらの IGBT は回路の簡素化に対しては有利であるが，スイッチング損失が大きくキャリヤ周波数は 1 kHz 以下に制限され，フィルタの大型化などの原因となる。富士電機では，スイッチング損失を大幅に低減するため，高耐圧 IGBT の代替として多直列接続した 1 kV 級定格の IGBT を適用する技術を開発している。本稿では，本技術を用いた鉄道車両および産業向けインバータを試作・評価したので，その内容について述べる。

## 産業プラントを支える可変速駆動システム

安藤　俊明　　木谷　剛士
富士時報　Vol.80 No.2 p.114–119（2007）

鉄鋼・製紙・石油化学などの産業プラントにおいて電動機の可変速駆動システムが数多く適用されている。電動機の可変速駆動システムとして，近年は交流電動機とインバータを組み合わせての適用が多い。可変速駆動システムにはファン・ポンプや単体機器に単独で用いられる汎用インバータと，製鉄や製紙のような産業プラントにおいて多数の組合せで用いられるプラント用可変速駆動システムがある。本稿では，可変速駆動システムの推移と富士電機の産業プラント用可変速駆動システムの代表機種について紹介する。

## 環境改善・省エネルギー用高圧インバータ

藤本　潔　　花澤　昌彦
富士時報　Vol.80 No.2 p.120–123（2007）

高圧インバータはパワーエレクトロニクス応用製品の中では比較的新しく，世界的に見ても製品化されてまだ 10 年たっていない。富士電機は 1999 年に発売し，これまで 300 台以上の納入実績があり，今後さらに国内外への拡販を進めていく。製品は 3.3 kV（280 ～ 3,750 kVA），6.6 kV（560 ～ 7,500 kVA）系列で，センサレス V/f 一定制御とベクトル制御の 2 タイプがある。また，豊富な機能（同期投入・解列，瞬時停電対応，同期電動機駆動）を選択でき，ファン，ポンプ，ミキサ，圧縮機などの多方面に使われている。

## 世界最大級のアルミ電解用整流設備

武藤　和弘　　西條　学　　森山　琴也
富士時報　Vol.80 No.2 p.124–130（2007）

輸送機械業界を中心に部材の軽量化のため，アルミニウム（アルミ）の需要はここ数年間年率平均 5 % で拡大している。アルミは，周知のとおりアルミナを電気分解することにより生産されるが，その際に多大な直流電力を必要とする。富士電機では，1960 年以来，電解用変圧整流器（以下，S フォーマという）を技術開発・改良を加えながら製作し続けており，その最先端の高効率・高信頼性の S フォーマは，世界中のユーザーから大きな評価を得ている。このたび，アルコア社の新鋭アイスランド製錬所に世界最大級のダイオード S フォーマ設備を納入したので，その特長を紹介する。

## フリッカ補償システムの最新制御技術

宇都　克哉　　篠原　博　　鈴木　明夫
富士時報　Vol.80 No.2 p.131–134（2007）

電力供給の「電気の質」に対する要求がより厳しくなってきている現在，フリッカ補償装置（SFC）の役割はより重要なものとなってきている。パワーエレクトロニクスを駆使した SFC には，サイリスタを用いた他励式 SFC および自己消弧デバイス（IGBT など）を用いた自励式 SFC がある。本稿では，フリッカ補償システム（他励式および自励式）の最新制御技術について述べる。

## 誘導加熱用高周波インバータ

倉田　巌　　亀田　昇　　三浦　敏栄
富士時報　Vol.80 No.2 p.135–140（2007）

誘導加熱および誘導溶解はさまざまな特長を持ち，産業界で幅広く活用されている。本稿では新たに製品化した 750 ～ 6,000 kW，50 ～ 500 Hz，複数の誘導炉を同時に運転可能な溶解電源と，50 ～ 500 kW，200 ～ 500 kHz 電縫管溶接機について，その特長，仕様などを紹介する。また，新たに開発した大容量高周波電源装置についても，その概要を報告する。

# Abstracts (Fuji Electric Journal)

## Advanced Design Technique for Power Electronics System

Satoki Takizawa Hirokazu Tokuda
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.106–109 (2007)

Generally speaking, urgent requests are being made for the downsizing, greater efficiency, higher performance, and increased reliability of power electronics products such as uninterruptible power systems and inverters used for variable-speed driving. Moreover, since product cycles are being shortened, it has also become necessary to market the products more quickly. Consequently, the development of these products requires speedy and highly accurate design technologies. Of the design technologies mentioned above, this paper introduces the tools that support the thermal design of IGBT modules and design of control software in the field of power electronics equipment.

## Fuji Electric's Power Electronics: Current Status and Future Outlook

Itsuo Kawamura Kiyoaki Sasagawa
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.100–105 (2007)

Power electronics equipment serves an active role in diverse areas of society. Both the usage and capacity of such equipment extend to wide-ranging areas, such as the power supplies for information equipment, uninterruptible power supplies, inverters for rolling mills, and rectifiers for aluminum smelting plants. This paper outlines the design methods and tools used for the efficient development of various types of power electronics equipment which is not applied common parts easily, using a minimum amount of operational resouces. And also it describes the market trends relating to the plants and components in which power electronics equipment is used, as well as how Fuji Electric addresses such matters.

## Variable Speed Control System that Supports Industrial Plants

Toshiaki Ando Tsuyoshi Kidani
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.114–119 (2007)

Many types of variable-speed driving systems for electric motors are used in industrial plants such as in the iron-making, papermaking, and petrochemical industries. In recent years, the combination of an alternate current electric motor and an inverter as the variable-speed driving system for electric motors has been adopted. There are two types of variable-speed driving systems: the multi-purpose inverter used exclusively for fan, pump and other single-body units of equipment, and the variable-speed driving system used in combination with many units for industrial plants such as in the iron-making and papermaking industries. This paper introduces the progress being made in variable-speed driving systems and Fuji Electric's representative models of variable-speed driving systems for industrial plants.

## A High Performance Inverters Technology for Rolling Stock Traction and Industry Applications

Yasushi Abe Masafumi Tabata Kunio Matsubara
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.110–113 (2007)

Recent years have seen the development higher-voltage-proof IGBTs and some with rated voltages similar to those of thyristors have been commercialized. These IGBTs provide certain advantages for the simplification of circuits, but cause large switching loss, restrict the carrier cycle to 1 kHz or lower, and require larger filters. In order to significantly reduce such switching loss, Fuji Electric has developed technology for applying an IGBT with 1 kV-class rated voltage that is multi-series-connected as a substitute for high-voltage-proof IGBTs. This paper describes the trial manufacture and evaluation results of a railway compartment and industrial inverter that we have implemented utilizing this technology.

## One of the World's Largest Transformer-rectifier Equipment for Aluminum Smelter

Kazuhiro Muto Manabu Saijo Kinya Moriyama
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.124–130 (2007)

The global demand for aluminum has been growing by an annual average of 5 % in recent years. This growth is largely being driven by the demand for lightweight solutions in the transportation equipment industry. As is well known, aluminum is produced by smelting alumina through electrolysis, which consumes a large amount of DC power. Fuji Electric has manufactured AC to DC power conversion systems or transformer-rectifier equipment that we call S-Formers since 1960 based on technical research development and refinement. Our S-Formers enjoy an outstanding worldwide reputation for high efficiency and high reliability. Since we have supplied S-Formers to a state-of-the-art smelter built by Alcoa in Iceland, this paper introduces the features of the equipment.

## High Voltage Inverter for Environmental Improvement and Energy Saving

Kiyoshi Fujimoto Masahiko Hanazawa
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.120–123 (2007)

The high-voltage inverter is a relatively new product among power electronics-applied products, and it is less than ten years since the product was first marketed anywhere in the world. Fuji Electric initially marketed this product in 1999, has delivered more than 300 units to its customers to date, and will proceed with further sales promotion both in Japan and overseas. We have two types of products in this category: the sensor-less stable V/f control and vector control types, each in 3.3 kV (280 to 3,750 kVA) and 6.6 kV (560 to 7,500 kVA) lines. In addition, these products offer many functions (synchronizing/parallel off, measures against momentary outages, and synchronized electric motor driving), and are used for many different types of devices including fans, pumps, mixers, and compressors.

## High Frequency Inverter for Induction Heating

Iwao Kurata Noboru Kameda Toshie Miura
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.135–140 (2007)

Induction heating and melting offer various features and have been widely used in industrial fields. This paper describes the features, specifications, and other aspects of newly developed products such as an induction furnace power supply (750 to 6,000 kW, 50 to 500 Hz) that can drive multiple furnaces simultaneously, and a tube welder (50 to 500 kW, 200 to 500 kHz). It also reports an overview of a newly developed, large-power, high frequency power supply.

## New Control System of Flicker Compensator

Katsuya Uto Hiroshi Shinohara Akio Suzuki
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.131–134 (2007)

Given the stricter requirements for "Quality of electricity" in power supplies these days, the role of static flicker compensator (SFC) is becoming more important increasingly. There are different types of flicker compensators which freely utilize power electronics, such as a thyristor controlled reactor (TCR) type and self-commutated type SFC using self-turn-off devices (e.g., IGBT). This paper describes the leading-edge technologies used to control the static flicker compensators (of both TCR type and self-commutated types).

## 400 V 系高効率オンライン UPS「7000D シリーズ」

福田　幸夫　　日永田　守　　幸林　久詩
富士時報　Vol.80 No.2 p.141–144（2007）

近年のコンピュータシステムの高度な情報統合やネットワーク化に加え，システムの効率化や安全性が重要度を増している。こうした背景から，無停電電源装置（UPS）にも「高効率・高信頼性」の要求が高まっている。さらに IDC（Internet Data Center）を含めたビル市場では配電系統も 400 V 系配電システムが主流になりつつある。これらの要求に応えた高効率・高信頼性の 400 V 系高効率オンライン UPS「7000D シリーズ」を製品化した。本稿では，その特長および仕様を紹介する。

## 高効率オンラインミニ UPS「GX200 シリーズ」

松尾　浩之　　大島　雅文　　石井　紀好
富士時報　Vol.80 No.2 p.145–148（2007）

コンピュータシステムの急速な発達に伴い，電力の安定供給の要求が高まっている。そのため，これらの電源として用いられるミニ UPS（無停電電源装置）に対して高信頼性の要求が高まっている。また，サーバの大容量化や環境への意識の高まりにより UPS も大容量化・高効率化が求められている。今回，富士電機ではデュアルコンバージョン方式を採用し，高性能と高効率の両立を実現したミニ UPS を製品化した。本稿では，それらの仕様および特長を紹介する。

## 情報通信を支える分散電源システム

保高　伸洋　　軽部　邦彦　　多和田 信幸
富士時報　Vol.80 No.2 p.149–152（2007）

情報通信装置に使用される各種 LSI［メモリ，FPGA（Field Programmable Gate Array），CPU など］の高速化，低電圧・大電流駆動化により，1 V 以下の動作電圧に対応できる電源が要求されており，交流入力から LSI までの電源構成が変化してきている。本稿では，これらの要求に対応した分散電源システムの例を紹介し，富士電機のフロントエンド電源，中間バスコンバータ，POL（Point of Load）コンバータについて製品例を示す。

## 鉄道車両におけるパワーエレクトロニクス技術

井上　亮二　　大庭　政利
富士時報　Vol.80 No.2 p.153–161（2007）

2005 年 2 月に京都議定書が発効に至り，国際法としての効力を持つようになった。鉄道はエネルギー効率が最も高く，経済的で環境に優しい大量輸送機関であり発展を続けている。今後は小型軽量・省エネルギー・省メンテナンスに加え，車内静粛性や高齢化対応などの快適性がますます求められるであろう。安全性，信頼性，経済性に対する要求とその後の高速化，省エネルギー化，環境問題への対応などの時代の要請に応えながら，技術革新を実現してきた新幹線車両主回路システムと在来線車両用補助電源装置における技術開発の取組み，先進技術および今後の技術動向について紹介する。

## 自然エネルギーの発電出力安定化技術

仁井　真介　　神通川　亨
富士時報　Vol.80 No.2 p.162–165（2007）

自然エネルギーを利用した分散型電源の電力系統への連系が増加している。しかし，自然エネルギーを利用した分散型電源は，自然条件に応じて出力が変動するため，系統の周波数や電圧の変動を生じさせ，問題となる場合がある。その欠点を補う手段として，二次電池やフライホイール，あるいはキャパシタを利用した電力安定化装置や複数の分散型電源と負荷により構成され，需給制御を行うマイクログリッドが有効である。本稿では，これらの電力安定化技術について，最新の技術を紹介する。

## 上下水道プラントのエネルギーマネジメントとパワーエレクトロニクス技術

長倉　善則　　安久津 信也　　山本 総一郎
富士時報　Vol.80 No.2 p.166–169（2007）

1997 年 12 月の京都議定書の採択に始まった地球温暖化防止への取組みは，$CO_2$ のほか環境ホルモンなど有害物質の抑制を加え，地球環境全体の保全に取組みが拡大している。上下水道事業でも，改正省エネ法の施行以来，さらに電気・熱エネルギーの消費原単位の計画的縮減が求められる中で，ますます環境負荷を低減した事業運営が必要となってきている。本稿では，省エネルギー評価シミュレータをエンジニアリングツールとして，マトリックスコンバータ，PM モータ，高圧 VVVF を省エネルギー関連機器として紹介する。

## Highly Efficient Online Mini-UPS–"GX200 Series"

Hiroyuki Matsuo Masafumi Oshima Noriyoshi Ishii
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.145–148 (2007)

The demand for stable electric power supplies has increased in line with the rapid development of computer systems. There has also been a growing demand for higher reliability regarding the Mini-UPS used as such power supplies. Moreover, the demand for high-efficiency and large-capacity UPS has increased as servers have achieved larger capacity and users are becoming more interested in the environment.

Fuji Electric has commercialized a new UPS applied to Dual-conversion for high-efficiency and high-performance. This paper introduces the specifications and features of this new series UPS.

## 400 V Series of Highly Efficient Online UPS– "7000D Series"

Sachio Fukuda Mamoru Hieda Hisashi Koubayashi
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.141–144 (2007)

In addition to the highly advanced integration of information and networking of computer systems in recent years, the efficiency and security of systems are now considered increasingly important. Against such a background, the requirements for the "high efficiency and reliability" of uninterruptible power supply (UPS) system are also increasing. Moreover, in the building construction market including IDCs (Internet Data Centers), 400 V systems are now becoming the major distribution systems being used. We have commercialized the highly efficient, highly reliable "7000D Series" of 400 V series of highly efficient online UPS devices in response to these requirements. This paper introduces the features and specifications of these products.

## Power Electronics Technology for the Railway Rolling Stock

Ryoji Inoue Masatoshi Oba
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.153–161 (2007)

The Kyoto Protocol became effective in February 2005 and was adopted as an international law. Railways offer the highest energy efficiency among all means of transportation and provide an economical and environment-friendly system of mass transport that is continuously evolving. From now on, railway transport will be required to have, in addition to streamlining, energy-saving, and maintenance-free features, more amenities including a noiseless coach environment and measures to meet the needs of elderly passengers. This paper introduces our approach to developing technology for the main circuit system of Shinkansen passenger compartments and auxiliary power supply units for the compartments of conventional lines. We have realized innovative technology in response to the requirements for safety, reliability, and economy, and more recently the requirements for higher speed, energy saving, and measures for addressing environmental issues. Moreover we introduce related advanced technologies and the future trends of such technologies.

## Decentralized Power Supply System that Supports Telecommunication

Nobuhiro Hotaka Kunihiko Karube Nobuyuki Tawada
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.149–152 (2007)

A power supply that can accommodate an operation voltage of 1 V or less is demanded by speed-up, the low voltage and large current drive of various LSIs (e.g., memory, FPGA–field programmable gate array, CPU) used for telecommunication devices, and changes in the power supply composition from AC input to these LSIs.

This paper introduces an example of a decentralized power supply system that can accommodate these demands, and cites Fuji Electric's front-end power supply, middle bus converter, and POL (point of load) converter products as examples.

## Power Electronics Technology for the Energy Management of Water Supply and Sewage Plants

Yoshinori Nagakura Shinya Akutsu Souichirou Yamamoto
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.166–169 (2007)

The activities to address the prevention of global warming that began with adoption of the Kyoto Protocol in December 1997 have expanded to cover preservation for the entire global environment with the suppression of such hazardous substances as environmental hormones in addition to $CO_2$. With regard to water supply and sewerage systems, under the circumstances requiring a deliberate reduction in the basic consumption units of electric power and thermal energy since the revised Law Concerning the Rational Use of Energy was enacted, operating businesses and projects are being required to further reduce environmental impact even more. This paper introduces the energy-saving evaluation simulator used as an engineering tool, as well as matrix converters, PM motors, and high-voltage VVVFs used as energy-saving-related equipment.

## The Smoothing Technology for the Generation of Natural Energy

Shinsuke Nii Toru Jintsugawa
Fuji Electric Journal Vol.80 No.2 p.162–165 (2007)

Grid connections to the electric power systems of decentralized power supplies utilizing natural energy have recently increased. However, since the output power of decentralized power supplies varies depending on natural conditions, such problems as fluctuating power frequency and voltage may occur. To address such problems, power smoothing devices utilizing rechargeable batteries, flywheels, capacitors, or micro grids composed of multiple decentralized power supplies and loads to control supply and demand are effective. This paper introduces the leading-edge technologies relating to these power smoothing equipment.

e-Front runners

# ネットワーク社会を信頼で支えます。

無停電電源装置

# 富士UPS

豊富なラインアップでネットワーク社会を守る，富士UPS。

## ミニUPS GXシリーズ

■常時インバータ給電デュアルコンバージョン方式
・常時インバータ給電方式の高品質
・総合効率93～95％の高効率

■海外電圧にも対応
・GX100シリーズ（100Ｖ系）：1～3kVA
・GX200シリーズ（200Ｖ系）：0.7～5kVA

■ラインアップが充実
・自立タイプ
・ラックマウントタイプ

パワーエレクトロニクスの富士電機システムズはUPSのトップメーカーとして0.5～2,000kVAまでワイドに製品をラインアップ。小容量分野に新型UPS「GXシリーズ」を新たに加え，ネットワーク社会のあらゆるニーズにお応えします。

お問合せ先：富士電機システムズ株式会社 電源統括部 電話（042）585-6827

昭和 40 年 6 月 3 日　第三種郵便物認可　平成 19 年 3 月 10 日発行（年 6 回 1，3，5，7，9，11 月の 10 日発行）富士時報　第 80 巻　第 2 号（通巻第 843 号）

本誌は再生紙を使用しています。

雑誌コード 07797-3　　定価 735 円（本体 700 円）