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。

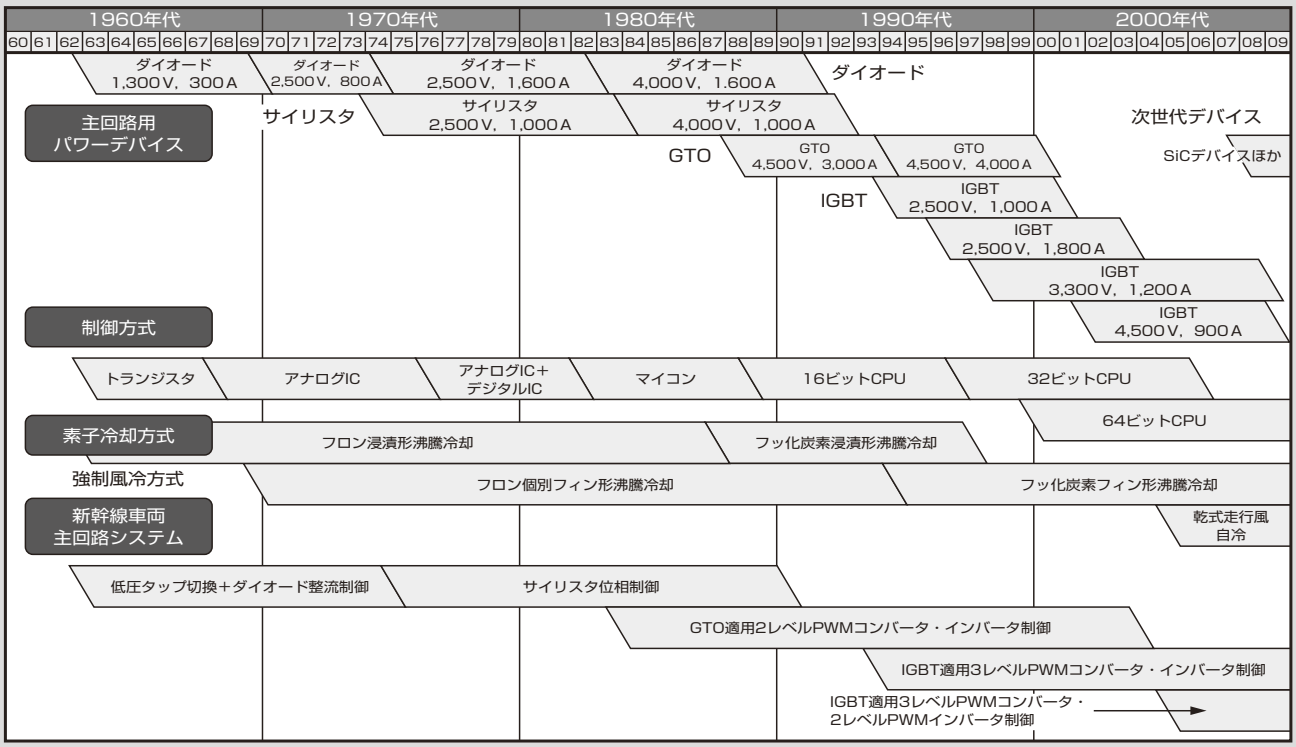
本稿では，富士電機における鉄道車両におけるパワーエレクトロニクス技術について紹介する。

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2,500 V，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2.6 km/h/s（700系：2.0 km/h/s），最高運転速度は山陽区間で300 km/h（700系：285 km/h）へ性能向上のため，編成出力を17,080 kW（700系：13,200 kW）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

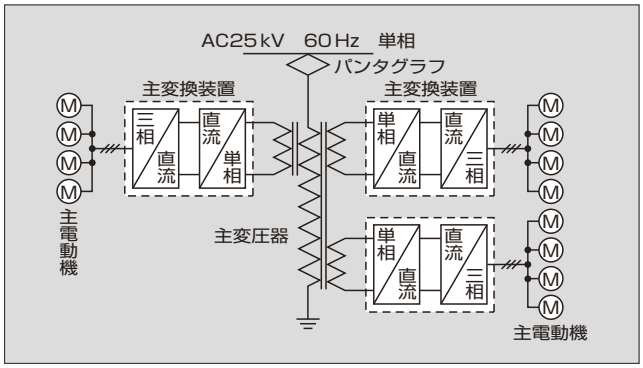


図 4　N700 系新幹線車両用 TCI3 形主変換装置

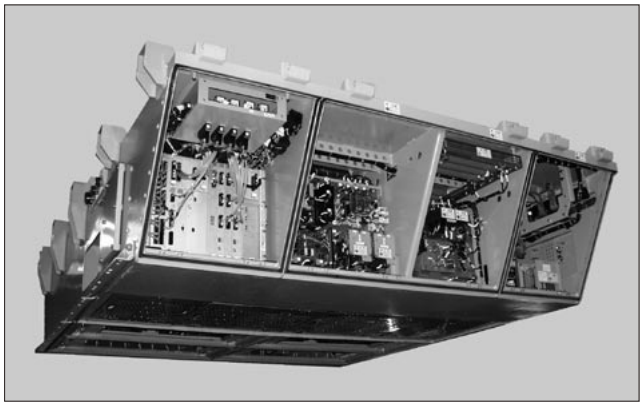


図 5　N700 系新幹線車両用 TCI3 形主変換装置の構造

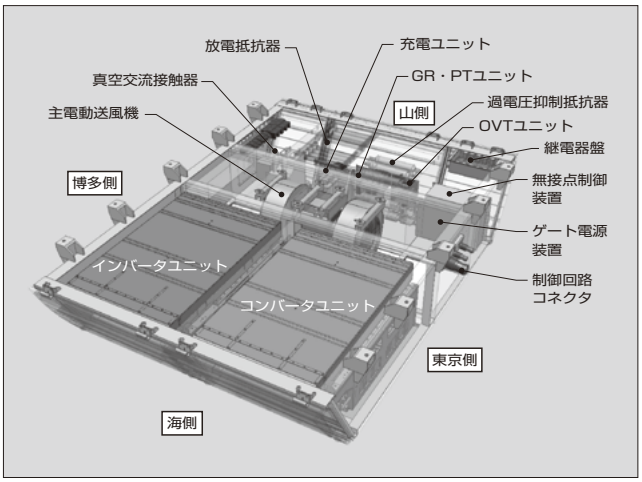


図 6　ブロアレス CI の外観と冷却メカニズム（走行風の流れ）

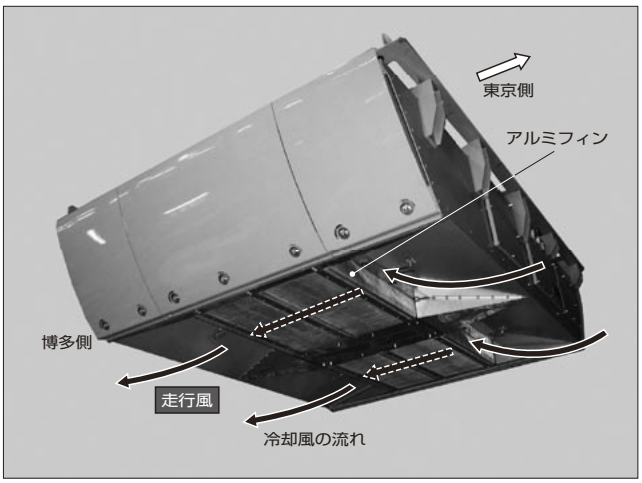
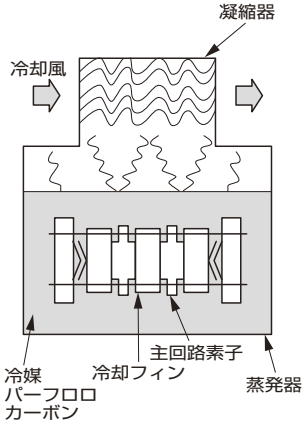
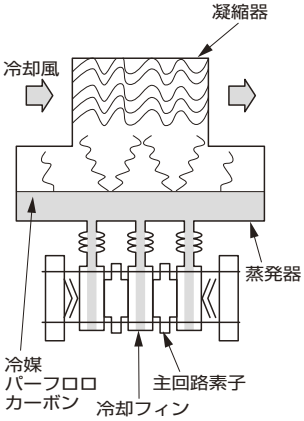
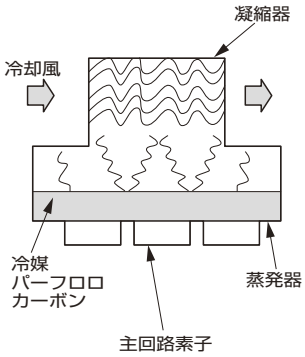
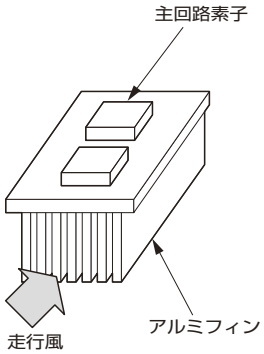


表１　主回路素子（パワーデバイス）冷却方式の変遷

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 ＋ 素子：タンク浸漬方式 ＋ ブロア強制風冷	沸騰冷却 ＋ 素子：個別冷却フィン方式 ＋ ブロア強制風冷	沸騰冷却 ＋ 素子：冷却板上取付け方式 ＋ ブロア強制風冷	アルミフィン冷却 ＋ 素子：冷却板上取付け方式 ＋ 走行風自冷
主回路素子	GTO （平形・非絶縁構造）	IGBT （平形・非絶縁構造）	IGBT （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 ○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 ○ブロアの保守が不要 ○ブロア分質量の軽減 ○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。

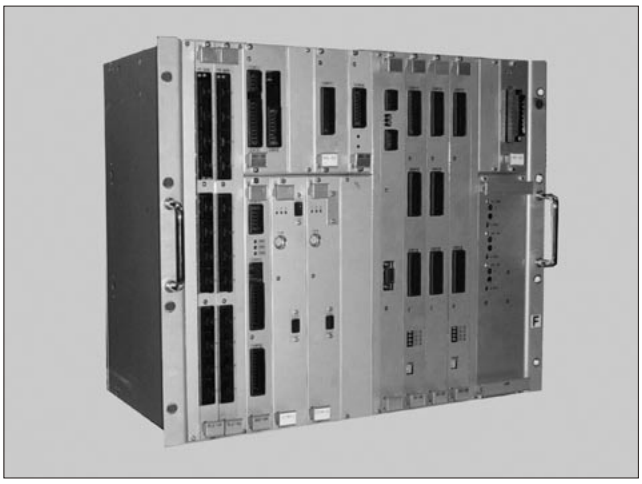
入出力機能として，運転指令などの伝送による入力，運転状態のモニタ情報の伝送による出力にも対応している。無接点制御装置の外観を**図７**に示す。

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。

図７　無接点制御装置



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。

(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

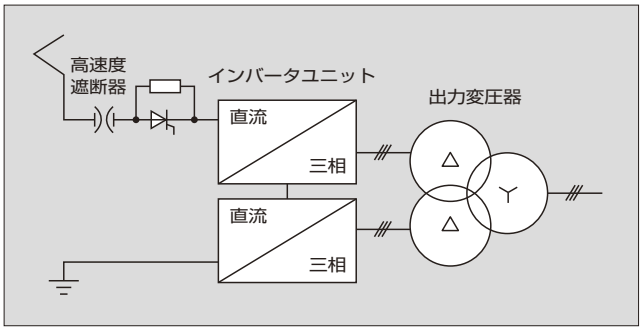


図 9　直流電車用補助電源装置インバータ 1 段方式の主回路構成

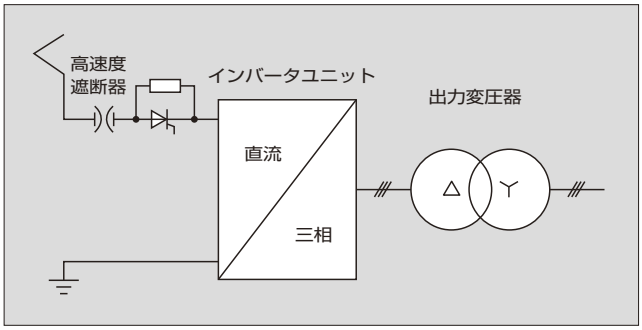


図 10　交流電車用補助電源装置の待機二重系主回路構成

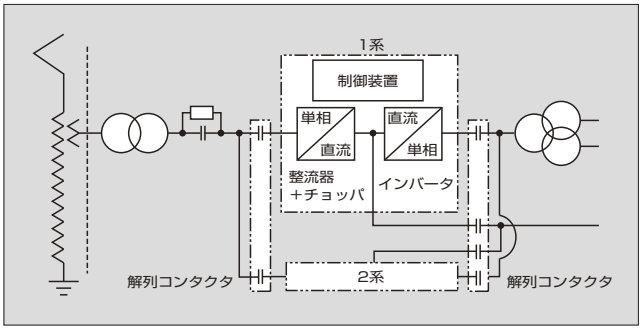
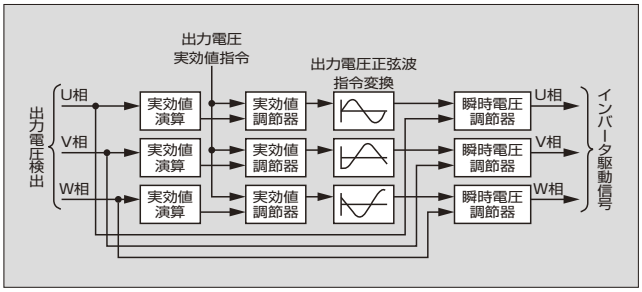


図 11　補助電源装置の制御ブロック図



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。

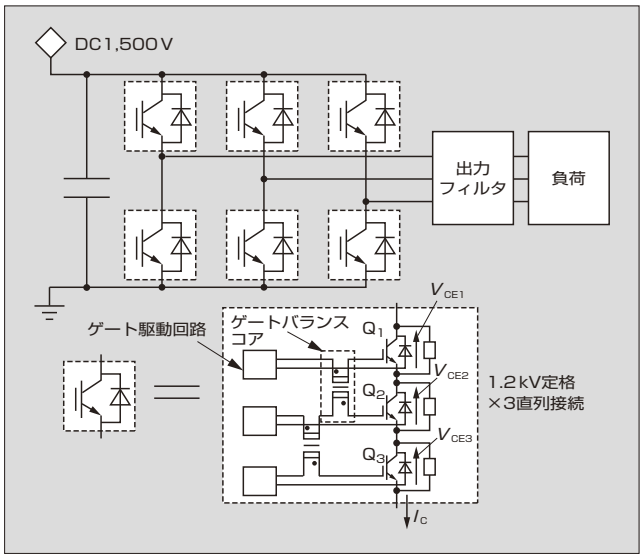
ハードウェアは32ビットCPUを2個搭載し，多岐にわたる演算処理を高速・高精度で実現可能とした。一方で制御演算，他方でシーケンス制御・モニタ機能・車上伝送機能などの処理を実行している。また，2個のCPU間のデータ伝送には，高速伝送可能なクロック同期式シリアル通信を用いて，直接伝送している。このように，データ通信技術，回路集積化技術を駆使し，部品点数の大幅な削減を実現させ，従来のラック・カード式からワンボードタイプとし，高信頼化を図っている。また，オプションとして，車上伝送基板，表示操作パネル基板の取付けができるように準備して複数系統の車上伝送に適用できるようにし，さまざまな顧客のニーズに対応可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

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

DC1,500V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3.3kV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，3.3kV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1kHz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，1.2kV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1,500V，出力容量170kVA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，1.2kV耐圧IGBT（Q1，Q2，Q3）を3直列接続して，3.3kV耐圧IGBTからの置換えを図っている。1.2kV耐圧IGBTは3.3kV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。

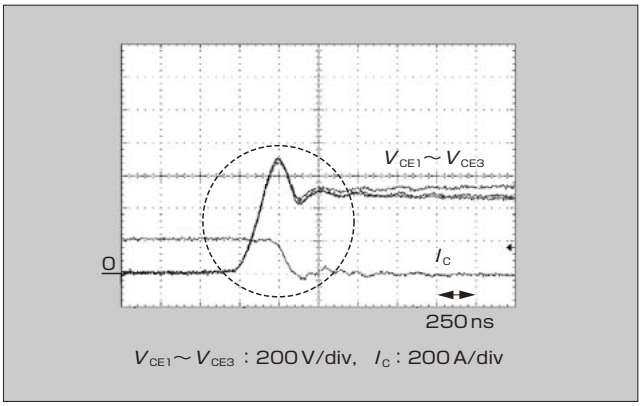
(1)　素子電圧バランス性能

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

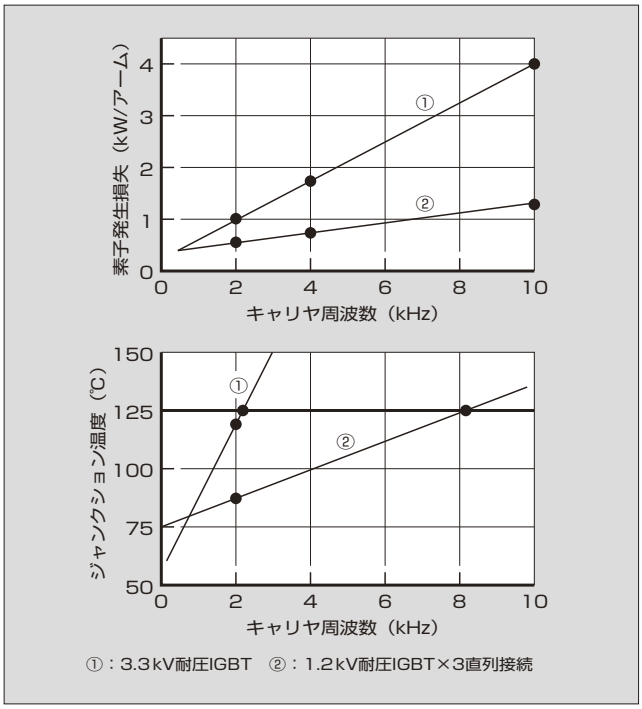
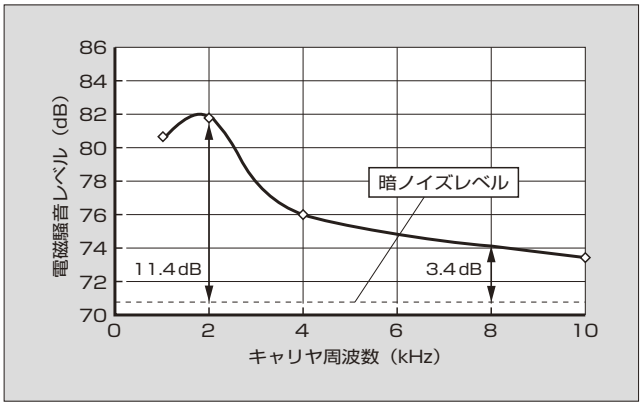


図15　出力フィルタの電磁騒音測定結果



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

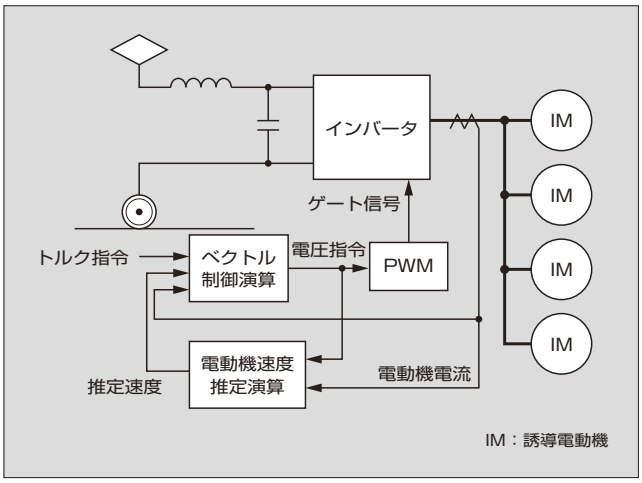


表2　速度センサレスベクトル制御方式の課題と解決方法

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.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。