

新幹線車両用主回路システム

井上 亮二 (いのうえ りょうじ)

土橋 栄喜 (つちはし ひでのぶ)

大澤 千春 (おおさわ ちはる)

① まえがき

新幹線車両用主回路システムは、東海道新幹線の1964年開業当初から運用されている0系車両に始まり、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、環境問題への対応といった時代の要請にこたえながら、技術革新を実現してきた(図1)。直流電動機に代えて交流誘導電動機駆動方式を採用することにより、主回路電気品の小形軽量化、主電動機の無整流子化による高速化・保守性への対応、主回路の無接点化による保守の大幅低減、交流回生ブレーキ方式の採用による省エネルギー化と経済性の向上によって、鉄道システムの発展に貢献してきた。その技術進歩は、主電動機を制御する変換器の主

回路用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・高速化といったパワーエレクトロニクス技術のめざましい進歩に負うところが非常に大きい。今後も、より快適で安全性・信頼性・経済性の高いシステムが追求されていくであろう。

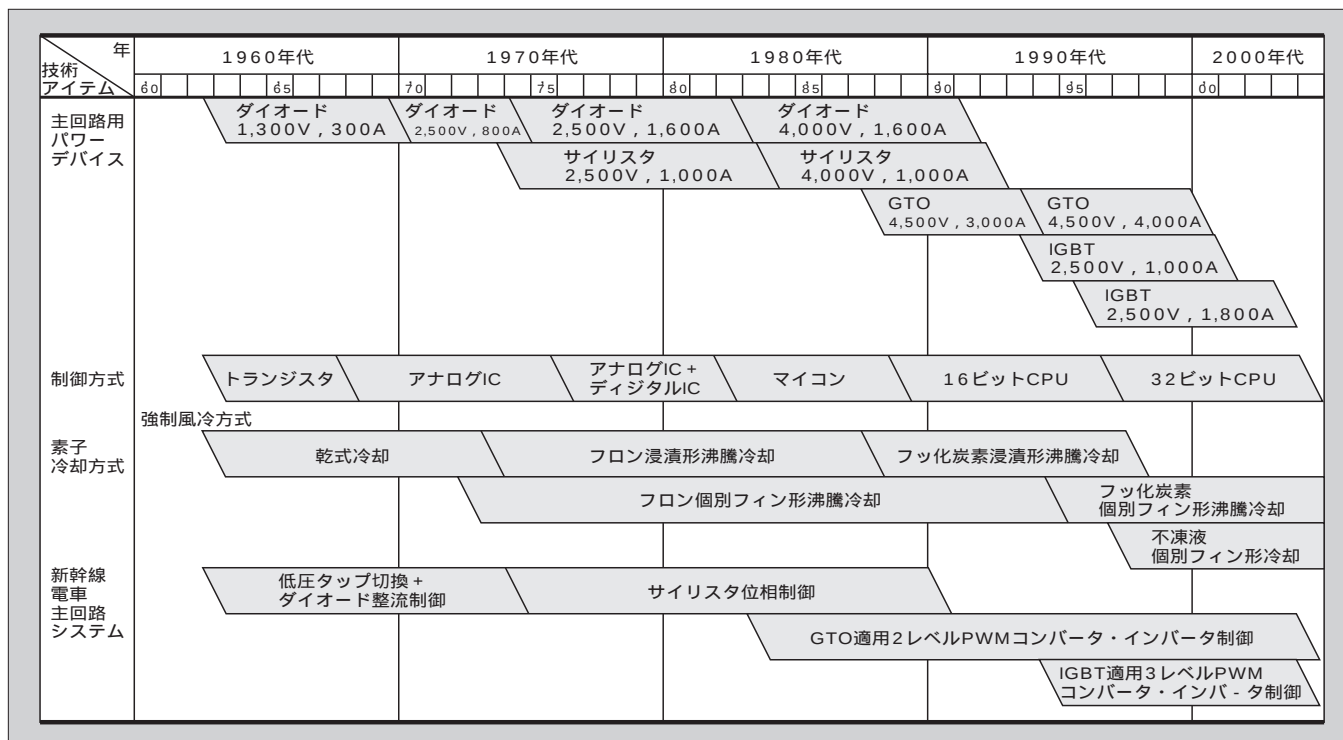
以下に新幹線車両用主回路システムの技術変遷における現状と主回路システム電気品の今後の技術動向について紹介する。

② 主回路システム

2.1 主回路システムの変遷

交流25kV電の新幹線車両において、東海道新幹線開業時(1964年)から運用されている初代車両である0系

図1 新幹線車両用主回路システム技術の変遷



井上 亮二

電気鉄道車両用電気品のエンジニアリング業務に従事。現在、システム事業本部交通・特機事業部交通技術第二部JR担当課長。



土橋 栄喜

鉄道車両用パワーエレクトロニクス応用機器の開発・設計に従事。現在、神戸工場制御設計部。



大澤 千春

パワーエレクトロニクス制御システムおよびその応用製品の研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発研究所ドライブシステムグループ主任技師。

図2 300系新幹線車両用主回路システム

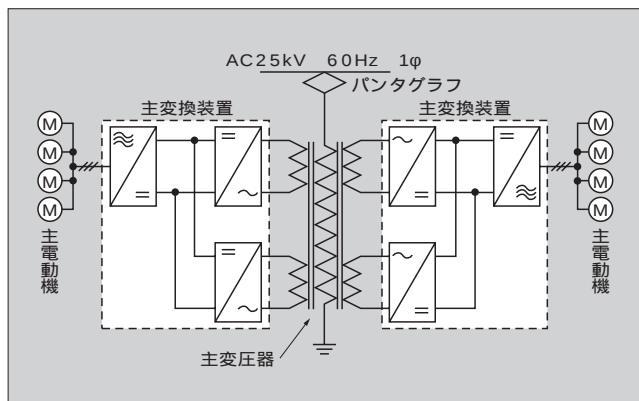


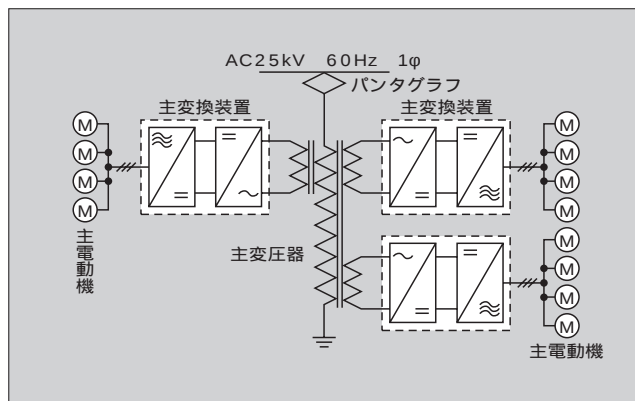
図3 700系新幹線車両の外観（写真提供：JR東海）



車両は、主変圧器二次側のタップ切換により交流電圧を制御し、ダイオード整流器により直流電動機を駆動する方式で、ブレーキは抵抗器で制動エネルギーを消費する発電ブレーキ方式であった。その後、パワーデバイスの進歩により、ダイオード整流器からサイリスタ整流器へと移行し、1981年に開業した東北・上越新幹線用車両として開発された200系車両には、主変圧器二次巻線を不等6分割とした、サイリスタ整流器によるパーニア位相制御方式が採用された。さらに、1985年に営業運用後約20年を経た東海道・山陽新幹線用の0系車両の後継車両として、また日本国有鉄道（国鉄）最後の新幹線車両として開発された100系車両には、サイリスタの高耐圧・大電流化（4,000V、1,000A）により実現された主変圧器二次巻線を4等分割した連続位相制御方式が採用された。

1980年代後半に新幹線車両の高速化の研究が進められ、そのなかで、騒音、振動などの環境対策および高速安定走行のために主回路システムには大容量化・小形軽量化が要求された。これらの要求を実現するためにGTO（Gate Turn-Off Thyristor）を適用したPWM（Pulse Width Modulation）制御コンバータ・インバータによる誘導電動機駆動方式と交流回生ブレーキ方式が開発され、国鉄分割民

図4 700系新幹線車両用主回路システム



営化（1987年）後の東海旅客鉄道（株）（JR東海）にて1990年に開発された300系車両で新幹線車両として初めて実用化された。

300系車両の主回路システムは、図2に示すように主変圧器二次4分割で4,500V、3,000A GTOを適用した2レベルコンバータが4台接続され、2台のコンバータ出力を並列接続し、フィルタコンデンサを有する直流回路を介して、GTO VVVF（Variable Voltage Variable Frequency）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VVVF駆動している。PWMコンバータ方式により、力率1の制御が可能になるとともに、高調波電流が各コンバータ間でのPWMキャリア位相差運転により、サイリスタ位相制御方式に比べ大幅に低減された。

2.2 主回路システムの現状

300系車両の実用化以降、新幹線主回路システムとしてGTOの2レベルコンバータ・インバータ方式が各JR新幹線車両に適用されてきた。さらなる高速化のために主回路システムの大容量化が要求され、JR東海が高速走行試験用として1995年に開発した300X系試験車両には、高速走行性能を満足するために主電動機が大容量化され、4,500V、4,000AのGTOが適用された。

このように、新幹線車両用主回路システムの技術革新は、主回路素子つまりパワーデバイスの高性能化・大容量化技術によるところが非常に大きい。近年では、GTOに比べより高速スイッチングが可能なパワーデバイスであるIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）の高耐圧・大電流デバイスが開発され、新幹線車両用主回路システムへの適用が可能となり、実用化されている。

新幹線車両の質的向上をめざすために、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、JR東海と共同で300系車両用に2,500V、1,000A 平形IGBTを適用した3レベル主変換装置を開発し、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の低減と高調波の抑制が確認された。

その成果をベースとして、JR東海の次期主力新幹線車両として700系車両（図3）が1997年に開発された。700

注 交流から直流に電力を変換するシステムとしては、順変換器、電源側コンバータなどが適正な技術用語であるが、本稿では慣用に従い、単に「コンバータ」と記す。

系主回路システムは、4両で1ユニットを構成しており、図4に示すように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VVVF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。

③ 主回路電気品

3.1 主回路システムの大容量化・小形軽量化

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形軽量化の相反する要求を満たすことにある。これまでに述べてきたように大容量化と小形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形軽量化および機能・性能向上が図られている。

新幹線車両駆動用主回路システムを構成する主変圧器、主変換装置（PWMコンバータ・インバータ）、制御装置および主電動機のそれぞれの特長、小形軽量化施策、低騒音化施策などについて以下に説明する。

3.2 主変圧器

主変圧器は、二次多分割巻線と三次巻線を有し、パンタグラフにて集電した電力を降圧して、車両を駆動制御する主回路システムと、補助電源や空調装置などの補助回路システムへ供給する。

新幹線車両用主変圧器に、小形軽量化が要求されるのは当然であるが、一般的には車体床下にぎ装されるため、寸法の制約、特に高さ寸法が厳しい。

また、新幹線車両に適用されるPWMコンバータ用主変圧器としては、PWM制御の安定性および高調波抑制の面から以下に記すような特性・設計を考慮しなければならない。

(1) 二次巻線の高インダクタンス化

PWM制御にて発生する高調波を抑制するためにコンバータに適用されるパワーデバイスのスイッチング特性を考慮し、高インダクタンス特性とする。

(2) 二次巻線間の疎結合化

主変圧器二次の多分割巻線に接続されるPWMコンバータ間で相互干渉を発生させないように、巻線間が互いに疎結合となるような巻線配置にする。

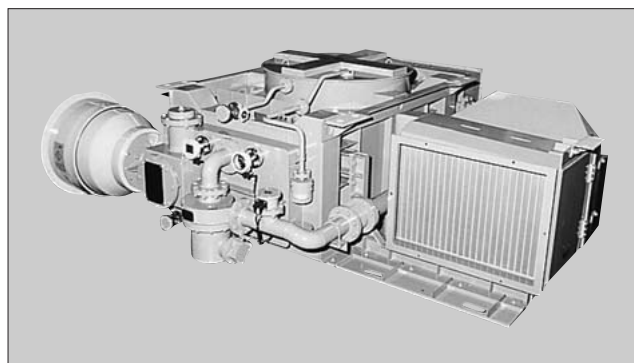
(3) 高調波損失の考慮

PWMコンバータにより発生する高調波電流の発生損失を考慮する。

PWMコンバータ用主変圧器二次多分割巻線のリアクタンスマトリックスの所要値を確保するために、最適なコイル配置にするとともにギャップ鉄心をコイル間に設置している。

また、小形軽量化のために、編成内主回路ユニット数の集約に伴う主変圧器の集約・大容量化により編成内主

図5 700系新幹線電車（量産車）用TTM3A形主変圧器



AM182044

変圧器合計質量の低減を図り、また、主回路システムにIGBT3レベルPWM方式を採用して高調波損失を低減させている。さらに、以下に記す主変圧器新技術により小形軽量化を図っている。

- (1) アルミコイル使用
- (2) コイル素線絶縁へのポリイミドフィルム使用
- (3) ガラスエポキシ材使用

これらの軽量化技術を盛り込んだ700系量産車用TTM3A形主変圧器の外観を図5に示す。

また、主変圧器騒音としては、GTOによる2レベルPWMコンバータにおいては、キャリア周波数が420～450Hz程度と低いため、低次高調波成分による主変圧器電磁騒音がやや大きく、また人の聴感上から耳触りと感じられる1～2kHz付近に騒音周波数成分のピークが現れる。そのため、電磁騒音低減施策としては、IGBTによるキャリア周波数の高周波化と3レベルPWM化による波形改善により、低次高調波成分を低減し、1～2kHz付近の騒音周波数成分を抑制することにより大幅な電磁騒音を低減し、その効果は確認されている。

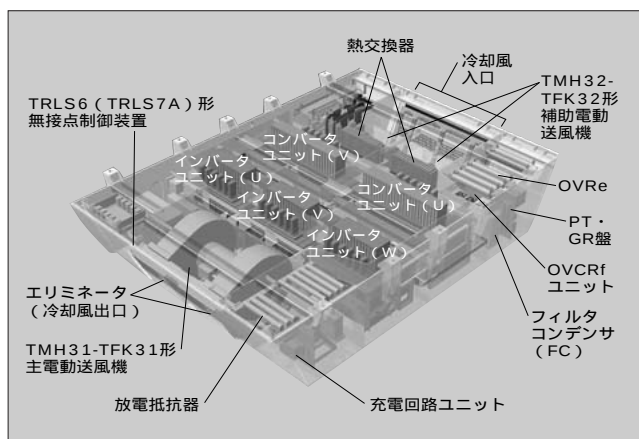
3.3 主変換装置

主変換装置は、PWMコンバータとVVVFインバータから構成され、インバータには主電動機4台を並列接続し、コンバータおよびインバータ制御を行う制御装置も内蔵されている。

従来の4,500V、3,000～4,000AクラスのGTOを適用した主変換装置の場合には、GTOのスイッチング性能および損失面からスイッチング周波数は500Hz程度以上には高くできないため、前述のように入出力波形ひずみの影響による主変換装置（コンバータ、インバータ）の電源である主変圧器および負荷である主電動機の電磁騒音の低減が課題となっていた。

IGBTの高耐圧化・大電流化により、車両用主変換装置への適用が可能となった。IGBTはGTOに比べて、スイッチング性能および損失面において優れており、新幹線用主変換装置に適用することにより、次のようなメリットを実現することができた。IGBTは700系車両に本格的に採用され、今後の主流になりつつある。700系量産車用TCI2A形主変換装置の外観を図6に示す。

図6 700系新幹線車両(量産車)用TCI2A形主変換装置構造



(1) 低騒音化

3レベルPWM方式で高周波スイッチングを採用したことにより、主回路の入出力高調波が低減し、主変圧器および主電動機の騒音の低減が達成された。

(2) 高効率化

ゲート駆動回路およびゲート電源の小形化、スナバ回路の低損失化・簡素化、アノードリアクトルの省略などにより、装置の変換効率を従来の約90%から約94%に高めることができた。

(3) 小形軽量化

大容量平形IGBT(2,500V, 1,800A)の採用により、コンバータ、インバータともに素子の1並列接続構成が可能となり、IGBTスタック構造の簡素化を図るとともにパワーユニット全体構造のコンパクト化を図った。さらに冷媒にフッ化炭素を使用し、平形IGBTの両面冷却構造に適した個別フィン沸騰冷却強制通風方式と組み合わせることにより、装置の小形軽量化を達成した。

(4) 高信頼性化

従来のGTO回路では異常な過電流時の保護動作として回路内の全GTOを一斉点弧するが、IGBTでは、その特性を利用して、異常な過電流時にはコレクタ電圧を検出してゲート遮断による全アーム一斉消弧を行う短絡保護回路(図7)をゲートアンプに内蔵し、装置の高信頼性を確保した。

(5) 省メンテナンス化

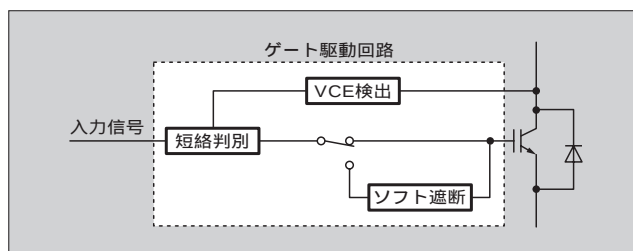
機器室内密閉循環冷却方式と車体側面のみで日常保守できる側点検方式の採用により、防じん・防水性を向上させ、信頼性の向上と省メンテナンス化を図った。

3.4 制御装置

3.4.1 コンバータ制御

コンバータ制御は、直流定電圧制御、交流電流制御、および中性点電位制御に大きく分けられる。特に3レベル変換器では、運転条件によっては正側のフィルタコンデンサ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ため、中性点電位制御はさまざまな方式

図7 短絡保護機能内蔵ゲートアンプ回路構成



が提案されている。富士電機は電力や電流の極性に依存しない、主素子のスイッチングの休止期間の制御による中性点電位制御を開発し、その有効性を実機組合せ試験で確認した。

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、コンバータの扱う電力や交流電流の極性による制御系の切替動作を必要としないため、交流電流のゼロクロス付近でも安定した制御を実現できる。

3.4.2 インバータ制御

安定したトルク出力、空転・滑走時の高粘着制御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もとに、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一次磁束基準形ベクトル制御を実用化した。以下に本制御方式の概要を述べる。

(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主電動機の並列台数に関係なく、共通の状態量である主電動機的一次磁束(インバータ出力電圧に相当する)を基準にして制御を行っている。

(2) 1パルスモード制御

車両用主電動機駆動制御では、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むため、全速度領域でPWMを行うために電圧制御余裕が必要となる従来のベクトル制御をそのまま適用することはできない。これに対して、一次磁束基準形ベクトル制御は、1パルス領域で励磁分とトルク分の二つのベクトル成分の関係を保持しながら、そのときの皮相電力(電圧利用率)が最大となるように電圧ベクトルを制御する。これにより、1パルスモードにおいても、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) 主電動機二次抵抗の温度変動補償

主電動機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デルの二次抵抗との

図8 加減速特性オシログラム

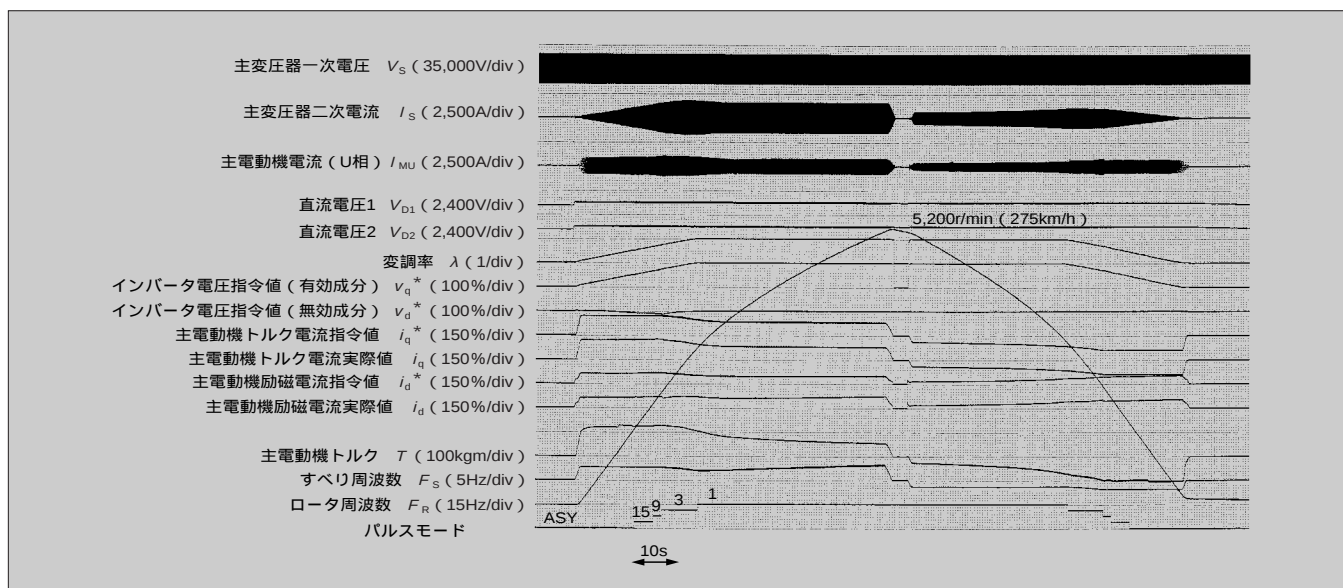


図9 E2系, E3系新幹線車両用 MT205 形主電動機



乖離 (かいいり) 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。一次磁束基準形ベクトル制御では、二次抵抗誤差が、電動機誘起電圧の無効分として現れるため、これをゼロとするようにすべり周波数を補正すれば、その補正量は二次抵抗誤差に相当する、すなわち主電動機二次抵抗の温度変動を補償することになる。

富士電機独自の制御方式を適用した制御装置と新幹線電車両主回路電気品との組合せ試験にて、性能検証した加減速特性オシログラムを図8に示す。

3.5 主電動機

新幹線車両用誘導電動機 (図9) の軽量化には、鉄心体積の削減が有効であり、その場合は磁束量を減少せざるを得ないので必要なトルクを得るための主電動機電流は大きくなる。したがって主電動機の軽量化はインバータの電流容量、すなわちインバータ用パワーデバイスの電流容量と V/f パターン (電圧/周波数特性) を併せて検討し、システムの最適化を図っている。

さらに構造設計において、以下に記す主電動機の小形軽

量化施策を実施し、経済性を考慮した実用化レベルで最軽量化が達成されているといえる。

- (1) フレームレス構造
- (2) アルミブラケット構造
- (3) 軸受小径化

軸受には電食防止のために外輪周上に絶縁皮膜をもつ絶縁軸受や長寿命グリースを採用し、保守性の向上を図っている。また、IGBT インバータ駆動用主電動機においては、高周波スイッチングに対応した巻線構造と堅ろうな回転子構造設計としている。

VVVF インバータ駆動時の主電動機騒音については、その発生要因として次の二つがある。

- (1) 低速走行時のインバータパルス切替時に発生する音色変化が人に与える耳障り感
- (2) インバータ出力電圧の低次高周波成分による電磁力モードと主電動機固定子の固有振動数とが共振することによって発生する電磁騒音

これらの耳障り感や電磁騒音の低減には、IGBT の高周波スイッチング性能を生かし、インバータ非同期 PWM 領域を高速域まで拡大することにより同期 PWM モードでの音色変化が抑制され、耳障り感をなくすることができる。さらに3レベルPWM化により低次高調波成分が抑制され、電磁騒音の低減が可能となる。

④ 主回路システムの将来動向

パワーデバイスの高機能・高性能・大容量化の進歩とともに新幹線電車両主回路システムは進展してきた。車両用主回路システムのパワーデバイスの主流となりつつあるIGBTは、さらに高周波化され、より一層の低騒音化、高調波低減に貢献すると期待される。また、IGBTの高耐圧化が進められ、新幹線電車両においてもパワーデバイスの少ない2レベル制御の主変換装置と、冷却性能向上および環境

対策としての水冷却方式が実用化されるであろう。

⑤ あとがき

新幹線車両用主回路システムの技術開発経緯と主回路電気品の概要および今後の動向について紹介した。

今後ともパワーエレクトロニクス技術の有力な応用分野の一つとして、将来を見据えた新幹線車両用主回路システムの開発を推進していく所存である。

最後に、これまでご支援、ご指導、ご協力を賜った関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- (1) 上野雅之ほか：700系新幹線電車用主変換装置の開発，鉄道サイバネティクス国内シンポジウム，Vol.34，p.175-178（1997）
- (2) 萩原善泰ほか：700系新幹線電車用主回路システムの開発，鉄道サイバネティクス国内シンポジウム，Vol.35，p.147-150（1998）
- (3) 大澤千春ほか：3レベル電力変換器の中性点電位制御方式，平成8年電気学会産業応用部門全国大会，p.171-174（1996）
- (4) 奥山吉彦・森安正司：PWMインバータ駆動誘導電動機の電磁騒音，平成10年電気学会全国大会，Vol.5，p.87-88（1998）

技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関
変圧器の逆励磁エネルギーを用いたフォワードコンバータの零電圧スイッチング	富士電機総合研究所 "	片山 靖一 黒木 一男	電気学会半導体電力変換研究会（1999-1）
An Investigation of Small Capacitive Current Breaking Performance Using an Analysis of the Restoring Breakdown Voltage	富士電機総合研究所 変電システム製作所 " 富士電機総合研究所 "	杉山 修一 佐藤 賢 堤 睦生 恩地 俊行 岩井 弘美	International Conference on Electrical Engineering（1998-7）
The R&D Trends of Micro-Actuator Technology	富士電機総合研究所	中澤 治雄	第4回国際マイクロマシンシンポジウム（1998-10）
Investigation of Flat-Pack IGBT Reliability	松 本 工 場 富士電機総合研究所 " 生産・システム企画	桐畑 文明 高橋 良和 脇本 博樹 新野 文達	IEEE-IAS（1998-10）
Development of Advanced PAFC Stack for 1st. commercial-type 100 kW Plant	技 術 開 発 室 " " "	花澤 真人 瀬谷 彰利 杉山 智弘 山本 修	Fuel Cell Seminar（1998-11）
Development and Business Promoting of On-site PAFC Power Plant at Fuji Electric	技 術 開 発 室 "	鴨下 友義 原嶋 孝一	
Propagation of Creepage Discharge on Solid Insulator in Insulating Oil(3)	富士電機総合研究所 "	仲神 芳武 宮本 昌広	ACED 98（Asia Conference on Electrical Discharge）（1998-11）
Micro-parts Conveyance Unit	富士電機総合研究所 " " " "	中澤 治雄 渡辺 泰正 森田 修 江戸 雅晴 米澤 栄一	IWMF 98（International Workshop on Microfactories）（1998-12）
Processes and Devices for SiC	富士電機総合研究所 " "	上野 勝典 辻 崇 浅井 隆一	US-Japan Conference on Wide Band Gap Semiconductor Technology for Next Generation Electron and Photonic Devices（1998-12）
Analysis on The Self-Clamp Phenomena of IGBTs	松 本 工 場 "	武井 学 藤平 龍彦	ISPSD 99（International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC）（1998-12）
The Influence Heat Treatments on Polymer Electrolyte Solution for Fuel Cell	富士電機総合研究所 "	人見美也子 ト部 恭一	The Gordon Research Conference on Electrochemistry（1999-1）



＊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。