

さまざまなニーズに応える 鉄道車両駆動用主回路技術

Power Electronics Technologies for Railway Traction Systems

河野 恭彦

Kono Yasuhiko

大河原 洋

Okawara Hiroshi

伊藤 謙

Ito Ken

福岡 徹

Fukuma Toru

日立グループは拡大するグローバル鉄道市場に対応するため、都市交通から高速車両までさまざまな顧客ニーズに応える幅広い鉄道車両駆動用製品をラインアップしている。中容量標準タイプでは、従来品と比較して外形寸法、質量とも20%以上低減したインバータを開発し実用化した。また、グローバル対応では、欧州仕様の車両、モータなどのマッチングを考慮して国内の2倍程度の高出力タイプのインバータを開発し、現在走行試験中である。

さらに、鉄道車両のさらなる省エネルギー化、省保守化を図るため、モータ効率を91%から95%に高めた高効率全閉誘導モータや、SiCダイオードとシリコンIGBTを組み合わせたSiCハイブリッドインバータを開発し、インバータ損失を35%低減する駆動システムを開発した。

1. はじめに

世界的な省エネルギー化の流れの中で、鉄道の重要性がますます高まってきている。

既存車両の更新需要が中心の国内市場では、より高効率、高信頼な最新主回路技術に対するニーズが高い。

一方、海外市場では各国の市場ニーズにマッチする多様な主回路電気品をタイムリーに提供する必要がある。

日立グループは、これらのニーズに応える幅広い製品をラインアップするとともに、高まる省エネルギーニーズに対しては、高効率全閉誘導モータやSiCハイブリッドインバータなどの新しい主回路技術を開発している。

ここでは、日立グループの鉄道車両駆動用主回路として、在来線車両用と高速鉄道車両用の主回路電気品のラインアップと特徴、および新たに開発した次世代主回路技術について述べる。

2. 在来線車両用の主回路電気品

在来線車両用の主回路電気品は、架線からの給電方式に

より、直流電車用と交流・交直流電車用に分類できる。ここではそれぞれの技術的な特徴と製品適用例を紹介する。

2.1 直流電車用インバータ装置

低損失・低ノイズIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) や高効率冷却器などの採用と、内蔵部品の徹底したユニット化、ファンなどの短寿命部品の排除により、従来装置に比べて、小型・軽量化、省保守化を実現した標準インバータをラインアップ¹⁾している(表1参照)。ラインアップは制御容量により、3タイプに分類でき、中容量タイプは機能と艱(ぎ)装形状によって、さらに3タイプに分かれている。架線電圧はいずれのタイプも600Vから1,500Vに対応している。以下ではラインアップの主力となる中容量の標準タイプの適用事例を紹介する。

(1) 標準タイプ：東日本旅客鉄道株式会社209系試験電車(MUE-Train)

東日本旅客鉄道株式会社では次世代車両制御システムの開発を209系試験電車(MUE-Train: Multipurpose Experimental Train)で行っている(図1参照)。これに対応するインバータ装置として、標準インバータを東日本旅客鉄道株式会社向けに初適用した。制御論理部はイーサネット^{※)}による制御伝送に対応している。

※) イーサネットは、富士ゼロックス株式会社の登録商標である。

表1 | 直流電車用主回路電気品のラインアップ

制御容量と機能などにより5タイプをラインアップしている。

制御容量 架線電圧	小容量 タイプ	中容量タイプ			大容量 タイプ
		標準	ブレーキ チョップ付き	低床車両	
600 V 750 V 1,500 V	地下鉄 モノレール ほか	通勤者 近郊車	海外都市交通	リニア地下鉄	近郊車 都市間車



注：略語説明 MUE-Train (Multipurpose Experimental Train)

図1 | 209系試験電車 (MUE-Train)

次世代車両制御システムに対応した標準タイプのインバータ装置を搭載し、2010年10月から各種走行試験が行われている。

(2) 標準タイプ：東日本旅客鉄道株式会社E233系3000番代増備車

E233系3000番代増備車向けに標準インバータ装置を適用し、既存装置に比べ大幅な小型・軽量化を実現している(表2、図2参照)。なお、従来品と新規品は、インバータ装置として、機器つり、性能面とも相互に互換性を有している。

(3) ブレーキチョッパー一体タイプ：海外都市交通

十分な回生負荷が得られない場合が多い海外の都市交通向けに、ブレーキチョッパーを一体化した発電ブレーキ対応のインバータを製品化している。この製品ではブレーキチョッパーを一体化することで、従来の装置に比べて14%

の軽量化を実現している。

(4) 低床車両タイプ：リニア地下鉄

リニア方式の地下鉄車両は、床下の機装スペースが限られており、インバータ装置の高さを抑える必要がある。このため、標準ラインアップシリーズ展開として素子配置と冷却器構造を見直すとともに、装置内の機器配置を低床車両向けに最適化し、機器箱高さ500mm(標準タイプに対して-24%)を実現した。

表2 | E233系3000番代インバータ装置の比較

E233系3000番代既存車とE233系3000番代増備車の寸法と質量を比較して示す。

項目	既存車	増備車
外形寸法 (幅×奥行き×高さ) (mm)	3,390×740×725	2,950×740×650 (-22%)
質量 (kg)	1,030	790 (-24%)



図2 | E233系3000番代増備車用インバータ装置の外観

E233系3000番代増備車に搭載している標準タイプに準拠したインバータ装置の外観を示す。既存車のインバータ装置に比べ、小型・軽量化を実現した。

2.2 交流・交直流電车主変換装置

直流電車の標準インバータラインアップで適用した技術を交流・交直流電车主変換装置に応用することで、従来装置に比べ、小型・軽量化、保守の省力化を実現している。交流・交直流電車の主回路電気品は単相交流を直流に変換するコンバータと、インバータを組み合わせた主変換装置で構成される。

日立グループの主変換装置の特長は、コンバータには新3レベルコンバータを搭載し、電源高調波と騒音の低減を図った点にある。新3レベルコンバータは独自の回路方式によって、従来の3レベル主回路からクランプダイオードを削除したシンプルな構成となっており、装置の小型化と高効率化を実現している²⁾。

2012年3月から営業運転を開始した東日本旅客鉄道株式会社の常磐線特急電車E657系の主変換装置は、新3レベルコンバータおよび前述の直流電车主変換装置インバータパワーユニットと同一シリーズ品を適用した。

九州旅客鉄道株式会社の817系2000番代、3000番代で

は、前述の新3レベル回路の採用およびインバータで実用化した低ノイズスナバレス主回路技術をコンバータパワーユニットに応用し、UV相を一体化し小型化した結果、独立2群構成の主変換装置を実現、短編成での冗長性を確保している。

3. 高速鉄道車両用の主回路

国内外とも 300 km/h 超の高速化は共通であるが、大きな傾向としては国内、海外で以下のように異なる。

国内では軌道への影響を低減するため、1軸当たりの質量低減と粘着率の確保を考慮し、動輪軸比率が高くなる傾向にある。このため、主変換装置1台の出力容量は制限され、300 kWモータ4台分を制御する構成が主流である。開発トレンドとしては、容量を変えずに、機器の小型軽量化や、高効率化など環境への配慮が盛んである。

一方、海外では比較的地盤が固い場合が多く、1軸当たりの質量が大きい欧州の動力集中型タイプの車両がベースとなっている。動力分散型の場合でも、日本と比較すると動輪軸比率は低く、主変換装置の容量は大きくなる傾向にあり、600 kW程度のモータを4台分制御する大容量の構成が必要となる。

次に、上記2タイプについて適用例を挙げて紹介する。

3.1 国内対応：小型・軽量タイプ

新幹線向け主変換装置は、1997年に東海旅客鉄道株式会社の700系新幹線電車向けにIGBTを採用して以来、3.3 kV耐圧のIGBTを用いた3レベルコンバータ・インバータ形式主変換装置を基本構成として展開を続けている。

2011年3月に営業を開始した東日本旅客鉄道株式会社のE5系新幹線電車は、同じく新型の新在直通用新幹線電車であるE6系新幹線電車(2013年春営業開始予定)との併結運用が予定されており、運転開始後段階的に国内最高の320 km/hまで高速化されることが予定されている。

日立製作所は、E5系新幹線電車で主変換装置と、E6系新幹線電車で主変換装置の共通化設計を行い、主回路機器の運用・保守の効率向上を行った。E6系新幹線電車は在来線を走行するため、小さな車体に合わせた小型の主変換装置が必要となった。

E5系用主変換装置のパワーユニットは、コンバータ二相分とインバータ三相分の一体型構造として、側面からの取り付け/取り外し可能な構成として、艙装スペースを有効活用し、装置の小型化に貢献するとともに、機器の着脱性を大幅に向上させた。また、主変換装置の吸気側(山側)に点検用カバーを設けて、主要な内蔵機器をまとめて機器配置することで、点検・保守が必要な内蔵機器の取り扱い



図3 | E5系新幹線電車で主変換装置の外観

E6系主変換装置と設計を共通化し、主回路機器の運用・保守の効率を向上した。

表3 | CRH380CL車両諸元

欧州車両の構成をベースにした中国独自品として開発された。

編成構成	16両(8M8T)
編成質量	1,000 t
架線電圧	25 kV
性能	路面出力600 kW×32軸
	営業最高速度380 km/h
車両製作	長春軌道客車股份有限公司

注：略語説明 M (Motor), T (Trailer)

が容易な構造としている。一方で点検頻度が少ないフィルタコンデンサ・抵抗器は、主変換装置中央の空きスペースを有効利用し、装置の小型化を図った(図3参照)。

3.2 海外対応：高出力タイプ

2010年北京-上海間旅客専用線開業をめざし、中国では高速車両が多く開発された。日立グループは、その一環として製作されたCRH380CLの電気品を、長春軌道客車股份有限公司より全25編成受注した。第1編成を水戸交通システム本部で、第2編成以降は日立永濟電気設備(西安)有限公司(HYEE)で製作する。

CRH380CLの車両諸元を表3に示す。

CRH3シリーズは、すでに走行中のCRH3(ICE3ベース)を基に、CRH380BL(電気品：シーメンス社製)が製作されている。今回受注したCRH380CLは欧州車両の構成をベースとしながらも、中国国内での独自開発品として位置づけられている。この開発では、欧州技術ベースの車両、モータ、主変圧器などとのマッチングが大きな課題となった。

主回路システムは、主変圧器1台につき主変換装置2台を接続し、1台の主変換装置で615 kWモータを4台並列接続した構成とした。また主変換装置の中間直流回路には補助電源装置を接続し、最大で160 kVA×3台の給電を可能とするとともに、セクション通過時にもインバータからの回生電力を使って補助電源装置が動作できる構成とした点が特長である。主変換装置のコンバータ回路は2群構成とし、大容量化とキャリア位相差運転による高調波低減に対応した。主変換装置諸元と主な開発要素を表4に示す。

2011年9月時点で、第1編成は車両メーカー構内試験を経て、北京市の鉄道科学研究院試験線にて調整、確認走行

表4 | CRH380CLの開発諸元

欧州車両設計に合わせた構成となっている。

出力容量	615 kW電動機×4台制御 + 160 kVA補助電源装置×3台
コンバータ	2レベルスナバレス構成×2群 (4.5 kV 900 A, IGBT適用)
インバータ	2レベルスナバレス構成×1群 (4.5 kV 900 A, IGBT適用)
構成ほか	・直流回路に補助電源装置接続, 防振ゴムを介して臍(ぎ)装 ・4,300×2,716×700 (mm), 3,380 kg

注：略語説明 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



図4 | CRH380CL主変換装置の外観

インバータ1群とコンバータ2群を同一筐(きょう)体に収納している。

試験中である(図4参照)。

4. 新しい省エネルギー技術

日立グループは、鉄道車両駆動システムのさらなる性能向上をねらい、さまざまな技術開発を進めている。ここでは、新開発の高効率全閉誘導モータと、低損失SiCハイブリッドインバータについて述べる。

4.1 高効率全閉誘導モータ

鉄道車両用モータは、省エネルギーに加えて省メンテナンス、低騒音のニーズがますます強くなってきている。これらを実現する新しい高効率全閉誘導モータを開発した(図5参照)。以下にその特徴を述べる。

(1) 内扇型全閉構造

従来の誘導モータでは、冷却のために外気をモータ内部に取り込んでいたため、モータ内部に塵埃(じんあい)が入り、定期的な清掃作業が必要であった。また、モータ内部の回転体の音が外部に漏れ、騒音の原因になっていた。

これに対応し、モータを密閉構造(全閉構造)とすることで上述の問題を解決するモータを開発した。全閉化のた



図5 | 高効率全閉誘導モータの外観

走行風によって効率的に内気を冷やすため、最適フィン配置を開発した。

めの最大の課題は、冷却風を機内に取り込めないことによる発熱の増加であった。

この対策として、今回は発生損失の低減と、冷却効率の向上を図った。発生損失低減のために電磁界解析による固定子・回転子構造の最適化と、回転子への低損失材質の適用により、モータ効率を91%から95%へ向上させている。また、冷却効率向上のために、通風・温度解析による内部循環ダクト構造と本体外部冷却フィン構造の最適化、および、補助ファンによる軸受部の冷却効率向上などを開発した。全閉化によって機内清掃レスを実現するとともに、従来比で30 dBの低騒音化を達成した。

(2) 非解体軸受部交換構造

シンプルな軸受部の新構造を考案し、回転子を抜かずに軸受部だけのメンテナンスを可能とした。

従来のモータでは、回転子を抜くためにクレーンが必要であったが、この開発品では回転子を抜く必要がないため、クレーンが不要となり、メンテナンス作業の場所の制約が解消されるとともに、作業時間も大幅に短縮できる。また、シンプルな軸受構造のため特殊工具が不要となり、工具の数などによる作業の制約も解消できた。

4.2 SiCハイブリッドインバータ

半導体スイッチング素子に新しいSiCハイブリッドモジュールを搭載したインバータを開発した(図6参照)。

SiCを使った半導体スイッチング素子では、750 V架線に対応した1.7 kV耐圧の素子は開発されていたが、国内で広く使われている1,500 V架線に対応した3.3 kV素子はなく、開発が強く望まれていた。

今回、3.3 kV耐圧のSiCハイブリッドモジュールを開発し、シンプルな2レベル構成で1,500 V架線に対応したインバータを実現した。以下にその特長を示す。

(1) 低損失化

SiCダイオードとSiのIGBTを組み合わせることで、ダイオードのスイッチング損失だけでなくIGBTがターンオ



図6 | SiCハイブリッドインバータの外観

素子の小型化と低損失化で40%の小型・軽量化を実現した。

ンするときのターンオンスイッチング損失も同時に低減できることに注目し、SiCダイオードとシリコンIGBTを組み合わせたSiCハイブリッドモジュールを開発した。これにより、ダイオードのスイッチング損失を $\frac{1}{3}$ に、IGBTのターンオン損失を $\frac{1}{2}$ 以下に低減でき、インバータの損失を35%低減した。

(2) 小型・軽量化

SiCハイブリッドモジュールは上述のように損失が少ないことから、同一の電流量で素子サイズを従来の $\frac{2}{3}$ に縮小している。また発熱が小さくなることと、熱・流体解析を活用した放熱フィンとヒートパイプレイアウトの最適化による冷却器の小型化などで、インバータ装置の容積と質量を従来比で40%低減した。

5. おわりに

ここでは、日立グループの鉄道車両駆動用主回路として、在来線車両用と高速鉄道車両用の主回路電気品のラインアップと特徴、および新たに開発した次世代主回路技術について述べた。

鉄道市場は今後ますますグローバル化が進み、鉄道駆動用主回路にもさらなる省エネルギー・省保守化が求められる。

日立グループは、今回紹介した鉄道車両駆動用主回路のラインアップと、新たに開発した次世代の主回路技術により、幅広い顧客ニーズに応じていく。

参考文献

- 1) 栗原, 外: 次世代小型高性能インバータ技術, 日立評論, 92, 2, 160~163 (2010.2)
- 2) 河野, 外: 車両向け小型低損失主回路の開発, 第41回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 509, 日本鉄道サイバネティクス協議会 (2004.11)
- 3) 石川: 3 kV級SiCダイオードを搭載したハイブリッドモジュール, 鉄道車両と技術 (2009.10)

執筆者紹介



河野 恭彦

1992年日立製作所入社, 交通システム社 水戸交通システム本部
プロセス設計部 所属
現在, 鉄道車両用インバータの開発に従事
電気学会会員



伊藤 謙

1986年日立製作所入社, 交通システム社 水戸交通システム本部
車両電気システム設計部 所属
現在, 鉄道車両用インバータの設計に従事
技術士(電気電子部門)
電気学会会員



大河原 洋

1994年日立製作所入社, 交通システム社 水戸交通システム本部
車両電気システム設計部 所属
現在, 鉄道車両用インバータの設計に従事



福間 徹

2008年日立製作所入社, 交通システム社 水戸交通システム本部
車両電気システム設計部 所属
現在, 鉄道車両用インバータの設計に従事
電気学会会員