

次世代の鉄道車両システムを支える パワーエレクトロニクス技術

Power Electronics Technologies Underpinning Next-Generation Rolling Stock Systems

青山 育也

■ AOYAMA Ikuya

近年、鉄道車両の高性能・高機能化に伴い、鉄道車両システムに搭載される機器の高性能化、高効率化、小型・軽量化、及び省エネ化のニーズが高まっている。

東芝は、次世代鉄道システムの様々なニーズに応えるため、パワーエレクトロニクス技術の開発に注力している。また、電力変換装置では、SiC（炭化ケイ素）パワー半導体デバイスの特長を生かし、省エネ化と小型・軽量化を更に進めている。当社は、これら最新のパワーエレクトロニクス技術を導入した鉄道車両用駆動システムや電源装置を開発し、提供している。

Accompanying the increase in demand for rolling stock with higher functionality and performance in recent years, there is a growing need for onboard equipment with larger capacity, higher efficiency, smaller size, lighter weight, and greater energy-saving capabilities.

Toshiba has been focusing on the development of power electronics technologies to fulfill these diverse requirements for next-generation railway systems. In particular, we have applied silicon carbide (SiC) devices, one of the next generation of power devices providing energy saving, compactness, and light weight, to power conversion equipment. We have enhanced these technologies and incorporated them into power electronics equipment that we are offering for rolling stock propulsion systems and auxiliary power supply systems.

1 まえがき

鉄道車両システムに適用されるパワーエレクトロニクス技術は、駆動システムや、補助電源システム、空調システムなどの省エネ化と小型・軽量化を実現するための基盤技術である。

このパワーエレクトロニクス技術は、社会インフラから家電製品まで、電気エネルギーを“つくる”、“くばる”、及び“つかう”といったあらゆる場面で適用され、電力を他のエネルギーに変換したり、自由に制御したりするためのキーテクノロジーになっている。パワーエレクトロニクス技術の適用分野を図1に示す。

パワーエレクトロニクス技術を適用して省エネ化や機器の小型・軽量化を図るには、以下に示すようなデバイスからソリューションまでの幅広い技術の開発や、実用化が必要になる。

- (1) 低耐圧から高耐圧までの幅広い電圧、及び大電流までをカバーするパワー半導体デバイス技術
- (2) 高効率で信頼性の高いモジュールや、ユニット、及び機器を実現する回路技術や、デバイス単体からシステム全体までをスルーした統合解析技術
- (3) 多様化する顧客のニーズに合わせて最適なソリューションを提供するシステムとサービス

2 パワー半導体デバイス技術

パワーエレクトロニクス技術により電気エネルギーの電圧、

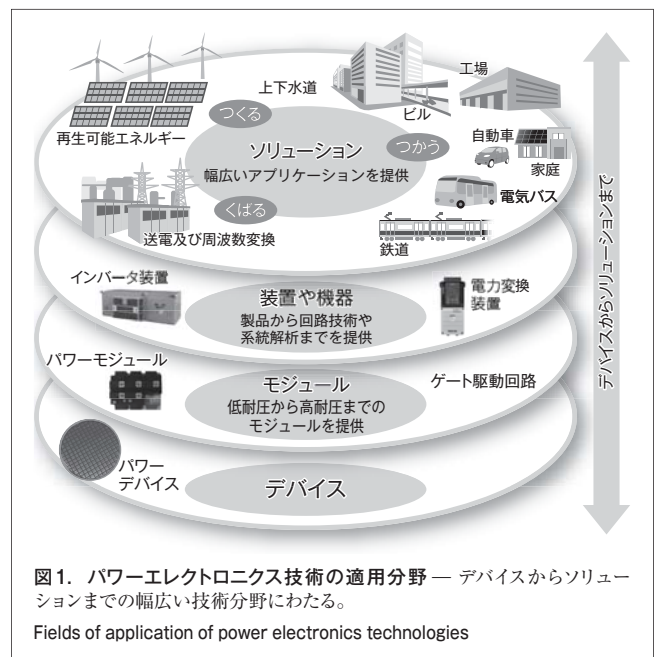


図1. パワーエレクトロニクス技術の適用分野 — デバイスからソリューションまでの幅広い技術分野にわたる。
Fields of application of power electronics technologies

電流、及び周波数を変換する電力変換装置のキーとなるのがパワー半導体デバイス（以下、パワーデバイスと略記）である。パワーデバイスの中でも半導体スイッチング素子、例えば絶縁ゲートバイポーラトランジスタ（IGBT：Insulated Gate Bipolar Transistor）などの性能の飛躍的な進歩で、電力変換装置の高効率化、及び小型・軽量化が図られてきた。

近年では、次に示すような、新しい半導体材料の適用、ライ

ンアップの拡大, 及びパッケージ技術の進化により, 更にパワーエレクトロニクス技術の適用分野が拡大している。

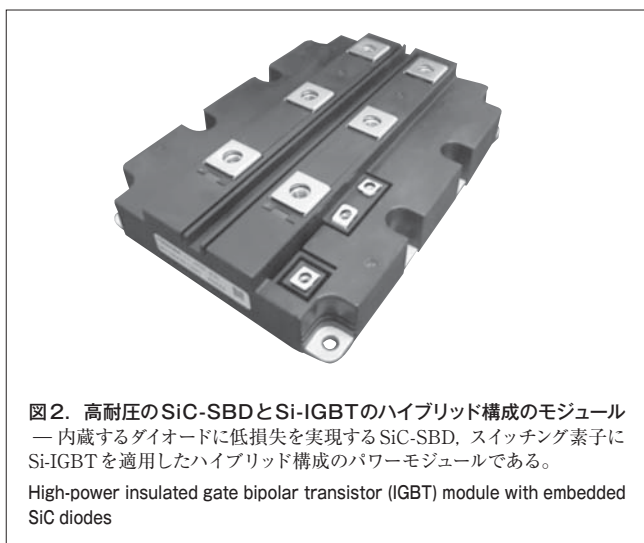
- (1) パワーデバイスの更なる低損失化 東芝は, 高耐圧 1,700 V 及び 3,300 V の, SiC (炭化ケイ素)-SBD (ショットキーバリアダイオード) と Si (シリコン)-IGBT のハイブリッド構成のモジュール (図2), 及びスイッチング素子とダイオードの両方に SiC を適用した All-SiC モジュールを開発した。パワーデバイスに SiC を適用し, オン抵抗とスイッチング損失を低減することで, 次世代鉄道車両システムの更なる省エネ化, 及び小型・軽量化に貢献する。
- (2) 幅広い電圧定格をラインアップ 電力変換装置の高耐圧化に適した IGBT として 6,500 V までの製品をラインアップすることで, 電力変換装置の高電圧対応と, 多段直列接続用途でのパワーデバイスの直列数, 及び部品点数の削減が可能になり, 信頼性向上にも寄与する。
- (3) 用途に応じたパッケージの提供 大容量電力変換装置向けのパッケージとして, 両面冷却が可能な“圧接型”, 及び取付けが容易な“モジュール型”の2種類を提供しており, 電力変換の負荷や用途に応じて選択できる。特に当社独自構造の圧接型パッケージは, 装置の小型化と同時に, 信頼性向上に貢献する。

3 PMSM 駆動用パワーエレクトロニクス技術

3.1 PMSM 駆動用 VVVF インバータ装置

鉄道車両では, 1両に4台の電動機を搭載する 경우가多く, 電動機を駆動する可変電圧可変周波数 (VVVF: Variable Voltage Variable Frequency) インバータ装置は, 電動機4台を一括制御する必要がある。

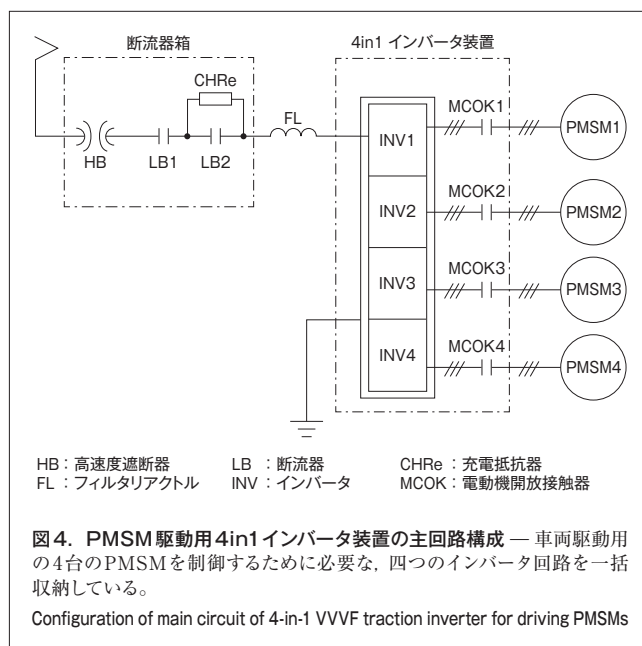
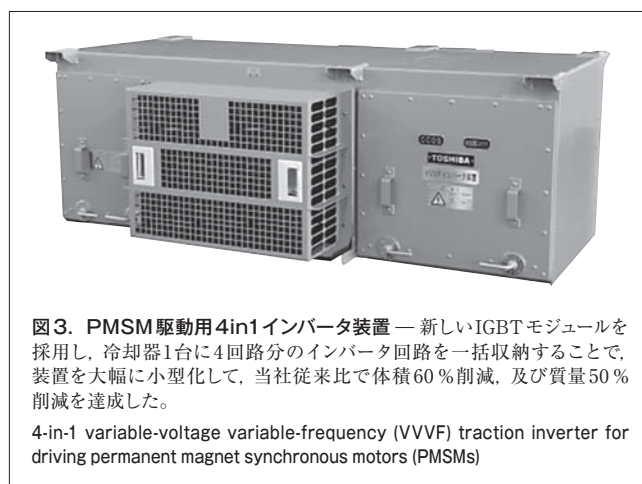
従来の誘導電動機を駆動する VVVF インバータ装置は, 誘導電動機のすべり周波数を主に制御することで, インバータ



1台で複数の誘導電動機を駆動できた。一方, PMSM (永久磁石同期電動機) は同期電動機であるため, 鉄道車両駆動用途ではその動作原理から1台のインバータ回路で1台のPMSMしか駆動できない。4台のPMSMを駆動する場合には, 4台のインバータ回路が必要になるため, 装置が大型化し, 車両への搭載が困難になる。

鉄道車両用としてPMSMを量産適用した当初は, 1台の冷却器で2回路分のインバータ回路を冷やす構成で, 4台のPMSMを駆動するためにインバータ装置内に2台の冷却器を搭載していた。

新たに開発したPMSM駆動用のVVVFインバータ装置 (以下, 4in1インバータ装置と略記) は, 新しいIGBTモジュールを採用し, 冷却器1台に4回路分のインバータ回路を一括搭載する構成で, 大幅な小型化を実現した^{(1),(2)}。装置の外観を図3に, 主回路構成を図4に示す。



3.2 4in1インバータ装置に最適なIGBTモジュール

PMSM駆動用の4in1インバータ装置で採用したIGBTモジュールは、定格でDC(直流)1,500Vの架線電圧がDC 900~2,000V程度まで変動することに対応するため、DC 3,300V耐圧で電流500Aの素子を2回路内蔵した、2in1の構成になっている。一つのIGBTモジュール内に2回路内蔵しているが、従来と同等の大きさである(図5)。

また、このIGBTモジュールは、高温動作仕様であり、従来の素子接合部動作温度が最高125℃であったのに対して、150℃までを保証している。これにより、冷却器を小型化できた。

4 All-SiCモジュールで高効率と小型・軽量化を実現するパワーエレクトロニクス技術

鉄道車両では、国内で一般的に使用される架線電圧がDC 1,500Vなので、そのままの電圧では空調や、照明、その他の機器などの電源として使用できないため、DC 1,500Vを入力してAC(交流)440Vなどを出力する補助電源装置を搭載している。この補助電源装置には、架線電圧や空調装置などの車両負荷との電氣的絶縁を目的として、出力部にトランスを設ける必要がある。このトランスの体積や質量は、出力容量が増えると増加し、高周波になると減少する。従来の商用周波(50~300Hz程度)トランスを用いると、補助電源装置の体積と質量の大半をトランスで占めることになり、装置を小型・軽量化するためには、このトランスの小型化が必要となっていた。

4.1 All-SiCモジュールと高周波トランスを適用した補助電源装置

当社は、SiC-MOSFET(金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ)とSiC-SBDを内蔵し、高周波スイッチングが可能な高耐圧、大電流、及び低損失のAll-SiCモジュールを自社開発し、これを用いて高周波インバータを構成することで、トランス

スを小型化し、装置の出力容量を保ったまま高効率化及び小型・軽量化を実現した⁽³⁾。

今回開発した補助電源装置は、高周波インバータと高周波トランスを用いてDC 660Vに電圧変換する高効率DC/DCコンバータ装置である(図6)。架線電圧DC 1,500Vを入力し、入力電流制御回路を介してAll-SiCモジュールを適用した高周波インバータ回路で、周波数16kHzの単相交流電圧に変換し、高周波トランスによって架線側と負荷側を絶縁し、整流回路によってDC 660Vに変換して負荷へ出力する。

従来装置で、体積及び質量の削減が課題だった絶縁トランスを高周波トランスにすることで、小型・軽量化を実現できる。また、高周波インバータ回路のスイッチング周波数は人間の可聴域上限に近い16kHzとしたため、ほとんど騒音が聞こえない。

外形は、高周波トランスの適用により、従来に比べて体積を91.7%削減した(図7)。

4.2 パワーユニット

電力変換を行うパワーユニットの回路構成を図8に示す。この装置は、架線電圧を分圧して二つのパワーユニットにそれぞれ入力している。電力変換回路は、入力電流制御回路に昇

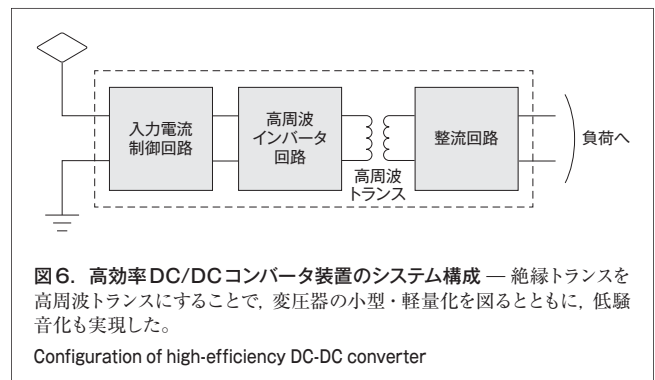


図6. 高効率DC/DCコンバータ装置のシステム構成 — 絶縁トランスを高周波トランスにすることで、変圧器の小型・軽量化を図るとともに、低騒音化も実現した。

Configuration of high-efficiency DC-DC converter

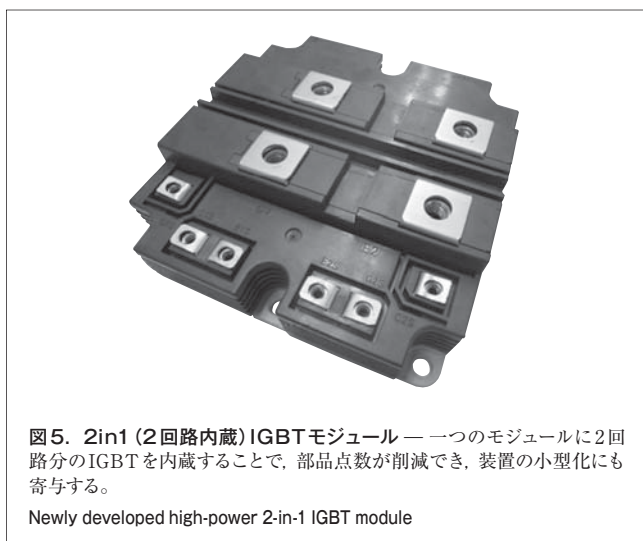


図5. 2in1 (2回路内蔵) IGBTモジュール — 一つのモジュールに2回路分のIGBTを内蔵することで、部品点数が削減でき、装置の小型化にも寄与する。

Newly developed high-power 2-in-1 IGBT module

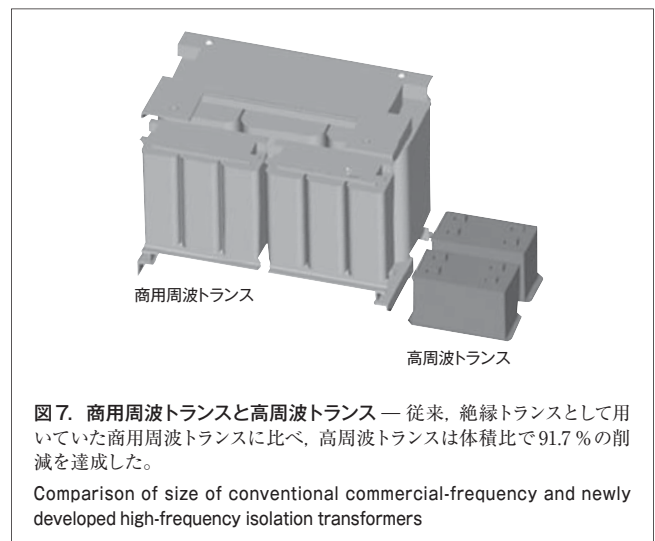


図7. 商用周波トランスと高周波トランス — 従来、絶縁トランスとして用いていた商用周波トランスに比べ、高周波トランスは体積比で91.7%の削減を達成した。

Comparison of size of conventional commercial-frequency and newly developed high-frequency isolation transformers

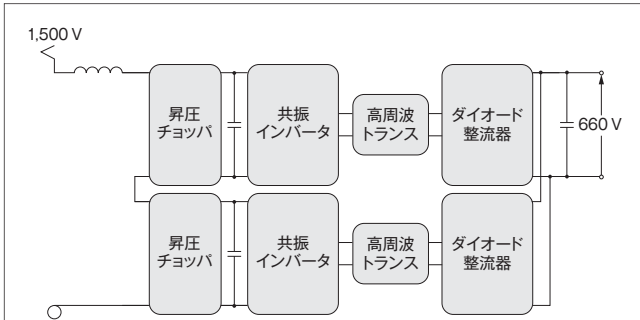


図8. All-SiCモジュール適用パワーユニットの回路構成 — All-SiCモジュールの適用と、高周波インバータ回路にソフトスイッチングが可能な共振方式を採用したことで、従来ユニットに比べ体積比で64%の削減を達成した。

Configuration of power unit circuit using all-SiC power devices

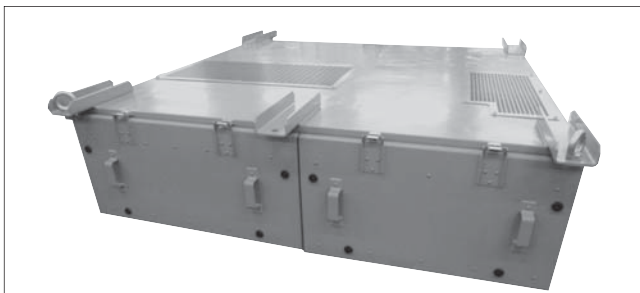


図9. 開発したDC/DCコンバータ装置 — 従来装置に比べ体積比で約41%の削減を達成した。

Newly developed DC-DC converter with high efficiency

圧チョッパを、高周波インバータ回路に共振インバータを、整流回路にダイオード整流器を採用した。また、高周波インバータ回路と整流回路の高周波リンク部には高周波トランスを用い、入力と負荷を絶縁している。

高周波トランス及びAll-SiCモジュールを適用したパワーユニットの採用により、高効率と小型・軽量化を実現したDC/DCコンバータ装置の外観を図9に示す。外形寸法は、1,650(幅)×1,500(奥行き)×450(高さ)mmで、体積が約1,114L、質量が595kgになり、当社従来装置に比べ体積で約41%、質量で約60%削減された。

また、定格電力出力時の電力変換効率は97%以上を達成している。

5 あとがき

当社は、新しいパワーデバイスや、回路、解析技術などの最先端パワーエレクトロニクス技術をベースとして、次世代の鉄道システムに向けた高性能化、高機能化、小型・軽量化、省エネ化、及び高信頼性を実現するための技術開発を進めている。

今後は、鉄道車両と地上側の電力や運行管理などのシステムが連携したエネルギーマネジメントが可能になる。更なる省エネと、環境負荷低減の実現に向けた技術革新を進めていく。

この研究開発の一部は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」の助成と、経済産業省補助事業「平成25年度先端技術実用化非連続加速プログラム」の補助金を受けて実施したものである。

文 献

- (1) 木下裕安 他. 省エネルギー車両を実現するシステム. サイバネティクス. 17, 4, 2012, p.19-24.
- (2) 富川英朝. 省エネルギーを実現する鉄道車両用電気品の技術. 自動車技術. 66, 10, 2012, p.79-83.
- (3) 河村恒毅 他. All-SiC素子を適用した鉄道車両用 高効率補助回路システム. 東芝レビュー. 69, 9, 2014, p.39-42.



青山 育也 AOYAMA Ikuya

インフラシステムソリューション社 府中インフラシステムソリューション工場技監。鉄道車両システム及びパワーエレクトロニクスの技術統括に従事。電気学会会員。

Fuchu Operations - Infrastructure Systems & Solutions