

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

High-Efficiency Auxiliary Power Supply System for Rolling Stock Applying All-SiC Devices to Inverter Circuits

河村 恒毅 真木 康次 小泉 聡志

■ KAWAMURA Koki ■ MAKI Koji ■ KOIZUMI Satoshi

近年、鉄道車両の高性能化及び高機能化に伴い、鉄道車両用補助電源装置の大容量化、高効率化及び小型化の需要が高まっている。

今回東芝は、高周波スイッチングが可能な高耐圧、大電流、かつ低損失のAll-SiC素子（半導体スイッチ及び逆並列ダイオードの両方が炭化ケイ素（SiC）で構成される素子）を用いて高周波インバータを構成することで、絶縁のための変圧器を小型化し、装置の出力容量を保ったまま、高効率化及び小型化を実現する補助電源装置を開発した。また、鉄道車両の補助回路全体の効率向上による省エネを実現するためには負荷となる空調装置の高効率化が必須となっており、これまで主流であったコンプレッサの駆動をオン/オフする制御方式から、コンプレッサを駆動するモータの回転数をインバータで制御する方式に変更し、更に補助電源装置と同様にAll-SiC素子を適用した空調装置を開発することで、消費電力量を低減できることを確認した。

The advancements in the performance and sophistication of rolling stock in recent years have given rise to the need for auxiliary power supply units with larger capacity, higher efficiency, and smaller size.

To meet these market requirements, Toshiba has developed a new type of auxiliary power supply system for rolling stock consisting of an auxiliary power supply unit, in which the output voltage is changed from the conventional three-phase AC to DC voltage, and an air-conditioning unit, which is the component that conventionally places the highest power consumption burden on an auxiliary power supply system. This system was developed applying our high-voltage, high-current, and low-loss all-silicon carbide (SiC) devices capable of high-frequency switching, including SiC power metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs) and SiC Schottky barrier diodes (SBDs), to high-frequency inverter circuits. The auxiliary power supply unit achieves high efficiency and compactness due to the development of a compact high-frequency isolation transformer while maintaining the conventional output capacity, and the air-conditioning unit achieves a reduction in power consumption due to the adoption of rotation speed control using an inverter drive for the compressor instead of conventional on/off control.

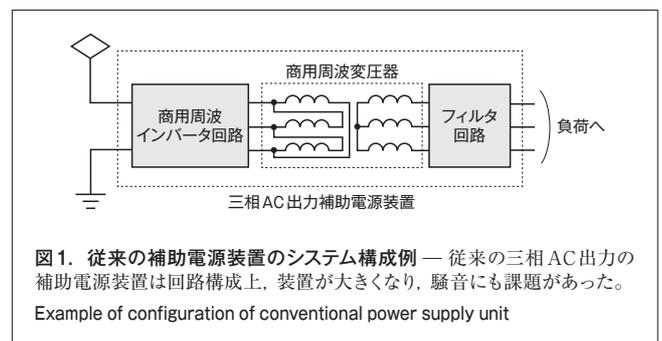
1 まえがき

省エネを追求した高効率の補助回路システムを実現するには、補助電源装置の高効率化と同時に、補助電源装置において最大の負荷である空調装置の高効率化が重要である。

今回東芝は、高耐圧のAll-SiC素子を適用したインバータ装置を組み込んだ補助電源装置及び空調装置を開発した。ここでは、開発したこれら装置の概要と、検証試験を実施して省エネ効果を確認した結果について述べる。

2 補助電源装置の開発

補助電源装置においては、架線と空調装置など車載負荷との電氣的絶縁を目的とした変圧器を出力部に設ける必要がある。この変圧器の体積と質量は、出力容量が増大すると増加し、高周波になると減少するが、従来の低周波（50～300 Hz程度）変圧器を用いると装置の体積や質量の大半を変圧器が占めるため、装置を小型・軽量化するうえで課題となっていた。今回、当社が開発した高周波スイッチングが可能な高耐圧、



大電流、かつ低損失のSiC MOSFET（金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ）及びSiC SBD（ショットキーバリアダイオード）の素子を用いて高周波インバータを構成することで、絶縁のための変圧器を小型化し、補助電源装置の出力容量を保ったまま高効率化及び小型化を実現した。

装置仕様として、直流（DC）1,500 V入力、DC 660 V出力、出力容量150 kWと定め、電力変換効率96%以上及び装置体積1,300 L以下（従来の同等装置1,900 Lに対して、体積を約30%削減）を開発目標とした。

2.1 従来の補助電源装置

従来の電力変換器である三相交流 (AC) 出力の補助電源装置のシステム構成例を図1に示す。この装置に入力されたDC電圧は三相インバータ回路によって50 Hz又は60 Hzの三相AC電圧に相当するパルス幅変調 (PWM) 波形に変換され、絶縁変圧器によって出力電圧へと変圧される。その後、PWM波形はフィルタ回路で正弦波に整形され出力される。従来の補助電源装置では、絶縁変圧器やフィルタ回路の電気部品は商用周波数に対応した体積の大きな用品を適用する必要があったため、装置全体の小型化及び軽量化の妨げとなっていたほか、装置の騒音となる磁励音の発生源でもあった。

2.2 開発品のシステム構成と構造

今回開発した高効率の補助電源装置 (以下、DC/DCコンバータ装置と呼ぶ) について、主要諸元を表1に、システム構成を図2に示す。

この装置はDC電圧1,500 Vを入力し、入力電流制御回路を介して高周波インバータ回路で周波数16 kHzの単相AC電圧へ変換し、変圧器によって架線側と負荷側を絶縁し、整流回路によってDC電圧に変換し、負荷へ出力する。従来装置においてその体積及び質量が課題であった絶縁変圧器を高周波AC回路に設けることで、変圧器の小型化と軽量化を実現できる。また、高周波インバータ回路におけるスイッチング素子は16 kHzの磁励音が発生するが、人の可聴域の上限に近い騒音としてはほとんど聞こえないと考えられる。

この装置の外形については、従来装置 (体積1,900 L) より体積比で約30 %削減 (体積1,300 L以下) を開発目標とした。高周波絶縁回路の適用により、従来の商用周波変圧器に比べて小型かつ軽量の高周波変圧器を採用した結果、従来に比べ

表1. DC/DCコンバータ装置の主要諸元

Main specifications of high-efficiency DC-DC converter

項目	仕様
入力電圧	DC 1,500 V
出力電圧	DC 660 V
出力容量	150 kW
主回路方式	高周波インバータ方式

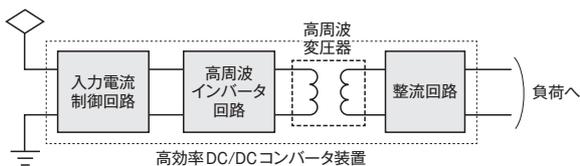


図2. DC/DCコンバータ装置のシステム構成 — 絶縁変圧器を高周波AC回路に設けることにより、変圧器の小型化と軽量化に寄与するとともに、騒音改善も図った。

Configuration of high-efficiency DC-DC converter

て体積比で91.7 %削減を達成した。変圧器外形を図3に、変圧器仕様を表2に示す。

次に、DC/DCコンバータ装置の電力変換部 (以下、パワーユニットと呼ぶ) の回路構成を図4に示す。この装置は架線電圧を2分圧してパワーユニットに入力しており、その電力変換回路は入力電流制御回路、高周波インバータ回路、及び整流回路の三つに分けられる。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は、高周波変圧器によって入力と負荷の絶縁が確保されている。

高周波インバータ回路にはソフトスイッチングが可能な共振方式を用いており、DC電圧を高周波AC電圧へ変換する際に

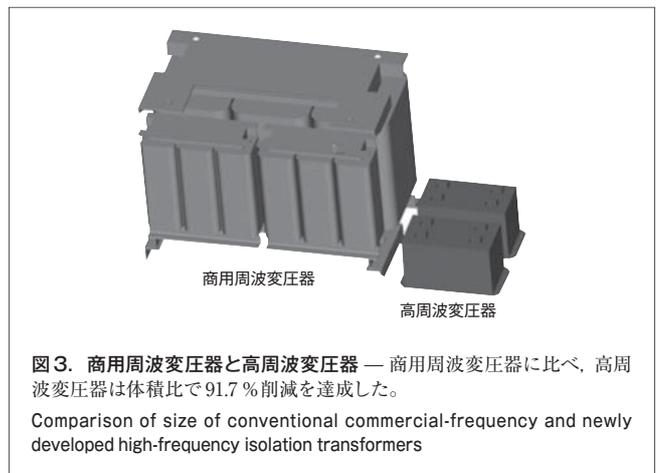


図3. 商用周波変圧器と高周波変圧器 — 商用周波変圧器に比べ、高周波変圧器は体積比で91.7 %削減を達成した。

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

表2. 変圧器の主要仕様比較

Comparison of main specifications of commercial-frequency and high-frequency isolation transformers

項目	商用周波変圧器	高周波変圧器
定格	150 kVA	160 kVA (80 kVA×2個)
外形 (幅×奥行×高さ)	695×530×610 mm	325×146×195 mm (単体)
体積	225 L	18.6 L (9.3 L×2個)

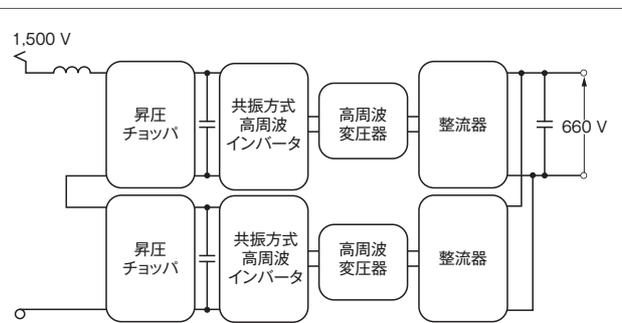


図4. パワーユニット回路構成 — 高周波インバータ回路にはソフトスイッチングが可能な共振方式を採用したことで、装置の小型化に寄与するとともに、従来装置に比べ体積比で64 %の削減を達成した。

Configuration of power unit circuit

発生するスイッチング損失を最小限に抑えることができる。変圧器の一次側及び二次側のインダクタンスとコンデンサ容量を、インバータ回路に用いるSiC MOSFETがターンオンしたときに振動電流が発生するように設定しており、半周期の電流が流れ終わったタイミングでSiC MOSFETをターンオフすることで、ソフトスイッチングを実現する。この共振インバータ回路では原理上インバータの通流率が固定されるため、出力電圧を調整することは不可能である。これを解決するため、今回入力部に架線電圧変動に対して電圧を安定化させる回路を採用している。すなわち、パワーユニット外に設置している入力リアクトルが持つインダクタンスを利用してDC電圧の昇圧を行い、高周波変圧器によって変圧された後のDC/DCコンバータ装置の出力電圧の制御を行う。これにより、高周波変圧器によって変圧された単相の高周波AC電圧は整流回路によって整流及び平滑化され、架線変動に関わらず、DC 660 Vを出力する。

パワーユニットの構造については、従来品が、体積が371 L、質量が130 kgであったのに対し、開発品は体積が135 L、質量が96 kgとなり（それぞれ2台のうち1台の値）、体積比で約64%削減、質量比で約26%削減を達成した。

前述の高周波変圧器を採用するとともに、パワーユニットの小型化を図った、DC/DCコンバータ装置の外観を図5に、従来装置との比較を表3に示す。外形寸法としては、1,650（幅×1,500（奥行き）×450（高さ）mm、体積が約1,114 L、質量が595 kgとなり、従来装置に比べ体積比で約41%削減され、開発目標

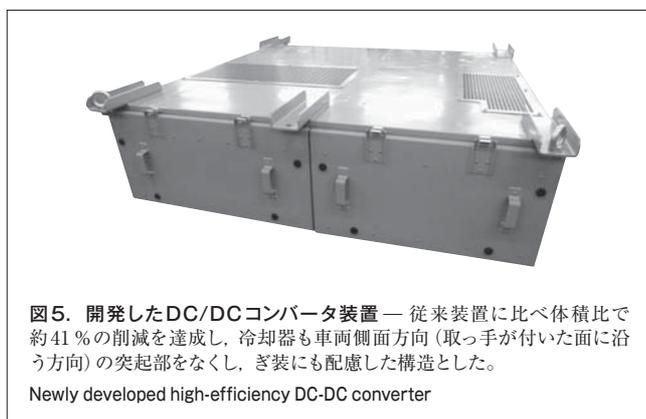


表3. DC/DCコンバータと従来装置の比較

Comparison of newly developed high-efficiency DC-DC converter and conventional auxiliary power supply unit

項目	開発目標	開発した装置	従来装置
装置体積 (従来比)	1,300 L (31.6%削減)	1,114 L (41.4%削減)	1,900 L
装置質量 (従来比)	—	595 kg (60.3%削減)	1,500 kg
電力変換効率	96%	97.3%	92%

を達成することができた。

更にこの装置は、あらゆる鉄道車両に搭載できるように高さを450 mmとし、また構造の簡素化のため、車両側面よりDC/DCコンバータ装置の冷却部の突起部をなくした構造とした特長も併せ持っている。

3 補助電源装置の検証結果

パワーユニットの試験として、SiC MOSFETによる昇圧チョップパのスイッチング損失測定を行った。その結果、これまでのシリコン(Si)素子のスイッチング損失と比べて、オフ損失で71%、オン損失で86%低減できる(当社比)ことを確認した。更に負荷設備と組み合わせ、DC/DCコンバータ装置が問題なく起動し停止できることを確認した。DC/DCコンバータ装置の入力電圧・電流及び出力電圧・電流を測定することで電力変換効率を求めた結果、定格負荷時に変換効率97.3%を達成した(表3)。

また、温度上昇試験を行い、パワー素子のジャンクション温度が規定値以下になるかどうかで冷却性能を評価した。その結果、周囲温度23.5℃時に素子直下の冷却器温度は108℃となり、素子のジャンクション温度と冷却器温度間の温度勾配13.0℃を加算すると、素子のジャンクション温度は121℃と見積もられた。周囲温度が45℃の場合にはジャンクション温度は142.5℃になるが、素子のジャンクション温度規定値が150℃以下であることを考慮すると、鉄道車両への適用が可能である。

4 空調装置の開発

従来の列車用空調装置は車両の補助電源装置から供給される商用AC電源でコンプレッサのモータを運転し、そのコンプレッサをオン/オフ制御することで車内の温度調整を行ってきた。

省エネを実現するには、コンプレッサのモータをインバータで駆動することで回転数を制御するか、又はコンプレッサのモータにDCモータを用いて高効率化することが一般に行われている。今回は更に、インバータへ高耐圧のAll-SiC素子を適用することで、インバータの小型化も図った空調装置を開発し、年間の消費電力を従来機種種の12%以上低減することを開発目標として検討を行った。

開発機種と従来機種種の仕様比較を表4に、構成比較を表5に示す。比較にあたって、開発機種として今後の市場性も考慮し集中タイプ(1台/1両)の46.5 kW (42,000 kcal/h)を製作し、従来機種2台分と比較検討を行った。

開発した空調装置とインバータユニットの外観を図6及び図7に示す。

表4. 開発機種と従来機種の仕様比較

Comparison of specifications of conventional and newly developed air-conditioning units

項目	開発機種	従来機種
入力電圧	DC 660 V	AC三相 200 V 60 Hz
コンプレッサ駆動方法	DC/DCインバータ駆動	商用電源駆動
コンプレッサ制御	コンプレッサ運転周波数制御	オン/オフ制御
コンプレッサ	DCロータリコンプレッサ	ACロータリコンプレッサ

表5. 開発機種と従来機種の構成比較

Comparison of configuration of conventional and newly developed air-conditioning units

項目	開発機種	従来機種 (1台分)
冷房能力	46.5 kW (42,000 kcal/h)	23.3 kW (20,000 kcal/h)
インバータ	All-SiCインバータ	—
コンプレッサ	DCロータリコンプレッサ	ACロータリコンプレッサ



図6. 開発した空調装置 — 46.5 kW (42,000 kcal/h) の冷房能力を持つ空調装置である。

Newly developed air-conditioning unit



図7. インバータ装置 — All-SiC素子を適用して小型化を実現した空調用インバータ装置である。

Inverter equipment for air-conditioning unit

5 空調装置の検証結果

JIS E 6602 (日本工業規格E 6602) で規定された標準条件(室内温度28℃, 室外温度33℃)でコンプレッサ運転周波数を変化させて測定した結果を表6に示す。同じ冷房能力において開発機種は従来機種より入力電力が4.4%少なくなり、熱効率は14ポイント改善されている。

表6. 開発機種と従来機種の測定結果の比較

Comparison of results of verification tests of conventional and newly developed air-conditioning units

項目	開発機種	従来機種 (2台分)
コンプレッサ周波数 (Hz)	140	—
空調総合入力電力 (kW)	15.95	16.68
エアコン出力 (冷房能力) (kW)	48.42	48.42
熱効率 (COP) (%)	304	290
年間消費電力量 (kWh/年)	26,761	30,544

COP: Coefficient of Performance

また、年間(冷房稼働時期)の消費電力を測定したデータと比較した結果も表6に併せて示す。開発機種の年間の消費電力は、従来機種より12.4%削減でき、削減量12%以上という開発目標を達成することができた。

6 あとがき

鉄道車両の高性能化及び高機能化への対応として補助回路システムの高効率化のために、All-SiC素子を適用したインバータを組み込んだ補助電源装置と空調装置を開発し、各装置の評価を行った。その結果、それぞれ当初の開発目標を達成する結果を得ることができた。今後は量産に向けた検討を進めていくとともに、更なる高効率化と小型化に向け性能向上を行っていく。

この開発は、独立行政法人新エネルギー・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」の助成を受けて実施したものである。

文献

- (1) 金 東海. パワースイッチング工学. 東京, 電気学会, 2003, 242p.
- (2) Mohan, N. Power Electronics. Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, 2012, 288p.



河村 恒毅 KAWAMURA Koki

社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場 鉄道システム部主務。鉄道車両用主変換装置及び補助電源装置の開発設計に従事。電気学会会員。

Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems



真木 康次 MAKI Koji

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用・パワーエレクトロニクス開発部。パワーエレクトロニクス機器の研究開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



小泉 聡志 KOIZUMI Satoshi

社会インフラシステム社 鉄道・自動車システム事業部 車両システム技術部参事。鉄道車両システムのエンジニアリング業務に従事。

Railway & Automotive Systems Div.