

環境配慮型鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器の最新動向 ～SiC適用インバータシステム, 補助電源装置～

中嶋幸夫* 出井和徳*
草野健一* 田中 毅*
山下良範*

The Latest Trend of Environment-Friendly Power Electronics Equipment for Railway Vehicles~Traction Inverter System with SiC Power Device & Auxiliary Power Supply System~
Yukio Nakashima, Kenichi Kusano, Yoshinori Yamashita, Kazunori Dei, Takeshi Tanaka

要 旨

近年、環境負荷の少ない移動輸送手段である鉄道の重要性が高まり、国内外で鉄道インフラ整備が進んでいる。

三菱電機は、鉄道車両用インバータについては従来Si(シリコン)を用いたパワーデバイスを適用した製品を製造してきたが、更なる環境負荷低減への取組みとして、SiC(シリコンカーバイド)を用いたパワーデバイスを適用したインバータシステムを開発した。

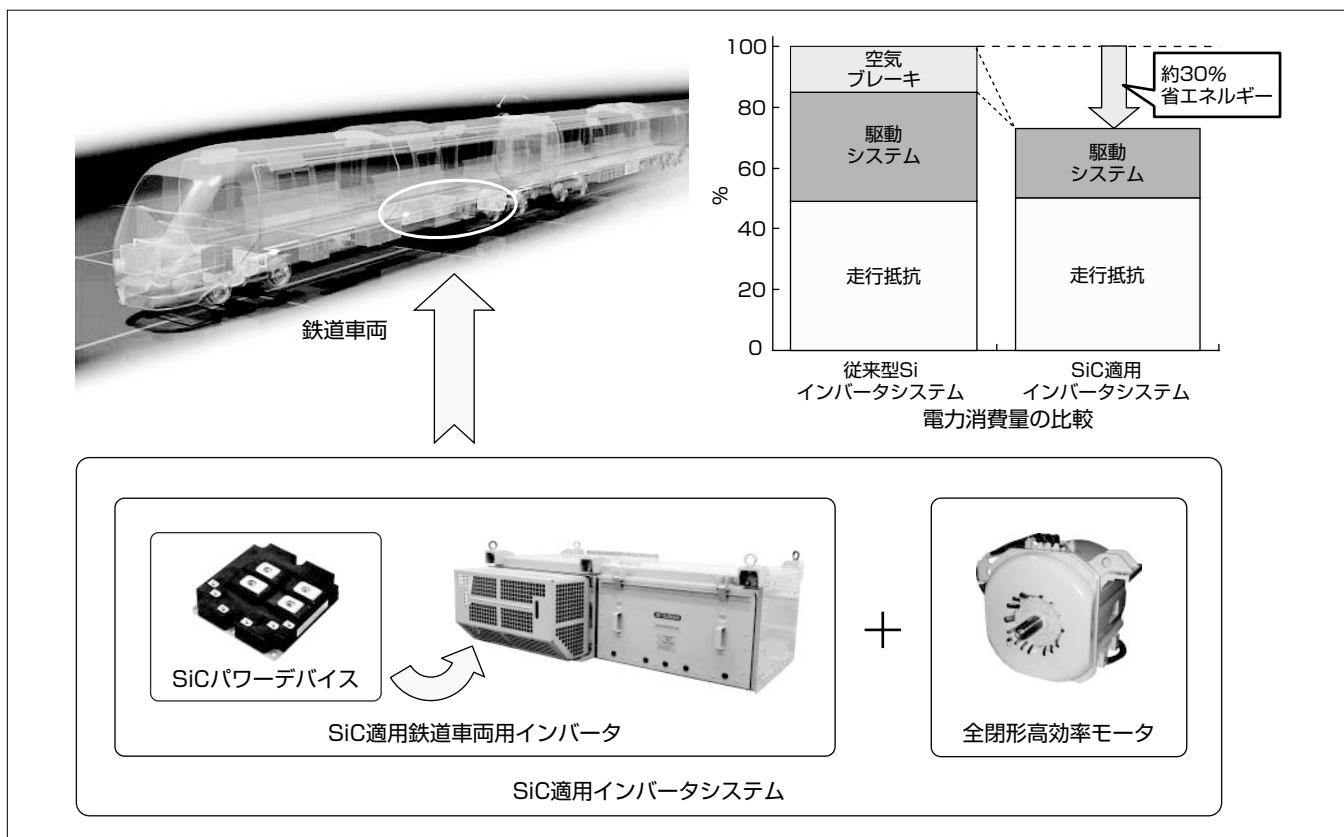
SiCパワーデバイスは、低損失・高温動作の特長を持った、Siパワーデバイスに代わるキーデバイスである。この特長を持ったデバイスを鉄道車両用インバータシステムに適用することによって、電力回生ブレーキ領域の拡大、高周波スイッチングによるモータ損失の低減等、主回路シス

テム全体の更なる省エネルギー化を実現した。

また、車内照明や冷暖房装置等の電源として使用される補助電源装置については、最新技術として高周波リンク方式があり、ここにSiCパワーデバイスを適用することによって装置として更なる小型・軽量化、省エネルギー・高効率化が期待できる。

本稿では、SiCパワーデバイスの特長とともに、車両エネルギー管理システム(TEMS)における新型主回路システムを担うSiC適用インバータシステムについて省エネルギー技術を述べる。また、補助電源装置の最新技術とSiCパワーデバイス適用への期待についても述べる。

特集 II



SiC適用インバータシステム

1.7kV/1.2kAの大容量SiCパワーデバイスの適用によって、回生ブレーキ性能を向上、Siパワーデバイス適用従来装置と比較してインバータ損失を低減、SiCパワーデバイス対応全閉形モータはSiCパワーデバイスの高周波スイッチング駆動によって発生損失を低減した結果、主回路システム全体として従来型インバータシステムに対し30%の省エネルギーを実現した。

1. ま え が き

近年、地球温暖化対策として、二酸化炭素(CO₂)排出量の削減が求められており、その対策の1つとして環境負荷の少ない移動輸送手段である鉄道の重要性が高まり、国内外で鉄道インフラの整備が進んでいる。

その中で、当社は従来Siパワーデバイス適用の鉄道車両用インバータシステムによって省エネルギー化や環境負荷の低減に寄与してきた。

今回、更なる省エネルギー化や環境負荷低減への取組みとして、大容量SiCパワーデバイスを適用した鉄道車両用インバータシステムの開発を行い、世界に先駆けて^(注1)製品化した。

本稿では、SiCパワーデバイスの特長とともに、SiCパワーデバイスを適用した鉄道車両用インバータシステムの省エネルギー技術について述べる。また、補助電源装置についても、その最新技術に加え、SiCパワーデバイス適用への期待について述べる。

(注1) 2011年10月3日現在、当社調べ

2. SiCパワーデバイスの特長

図1にSiダイオードとSiCダイオードの構造を示す。SiCはSiに比べて、高温動作が可能で、さらに、絶縁破壊電界強度が約10倍となるため、半導体の厚さを薄くすることが可能となる。これによって従来のSiに比べ大幅なオン抵抗の低減が可能となる。

その結果、従来の高耐圧用ではオン抵抗が大きく採用できなかったショットキーバリアダイオード(SBD)の使用が可能になる。SBDはユニポーラデバイスであり、従来のSiダイオードでの逆回復が存在せず、ダイオードのターンオフ損失の大幅な低減が可能となる(図2)ほか、ダイオードの逆回復電流がないため、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)のターンオン損失も低減する(図3)。

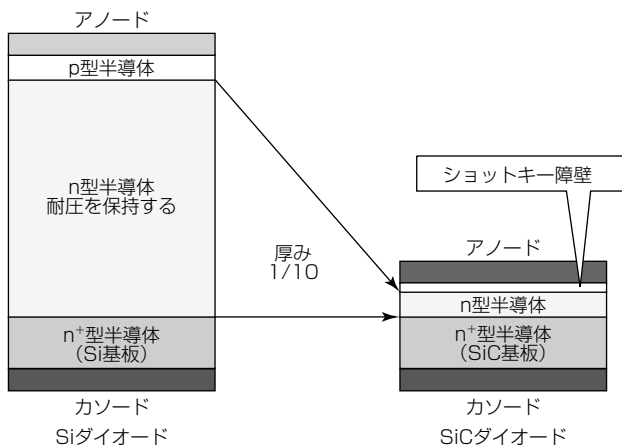


図1. ダイオード構造の比較

3. 鉄道車両用SiC適用インバータシステム

3.1 鉄道車両における消費電力の分析

Si-IGBT及びSiC-SBDを搭載したSiCパワーデバイスを適用することによって、従来の大容量Siパワーデバイスに比べてインバータ電力損失が約30%低減することが報告されている。

しかし、図4に示すように、従来の鉄道車両用主回路システムにおける入力電力量に対する発生損失の内訳によると、インバータの電力損失は、主回路システム全体での発生損失に対して占める割合が低いことが分かる。このこと

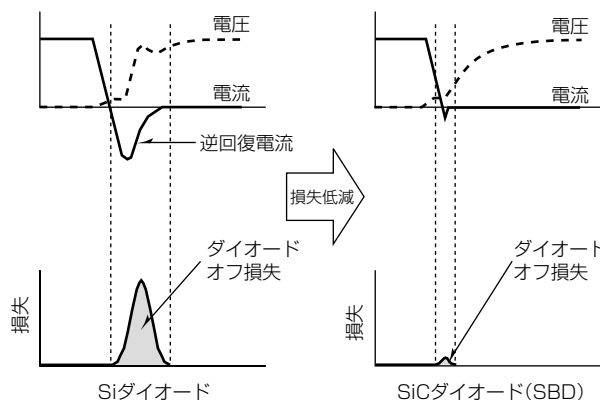


図2. SiダイオードとSiCダイオード(SBD)のターンオフ波形と発生損失比較

IGBTターンオン時にはダイオードの逆回復電流が重畳するが、SiC-SBDを適用した場合、逆回復電流がないため、IGBT側の損失も低減。

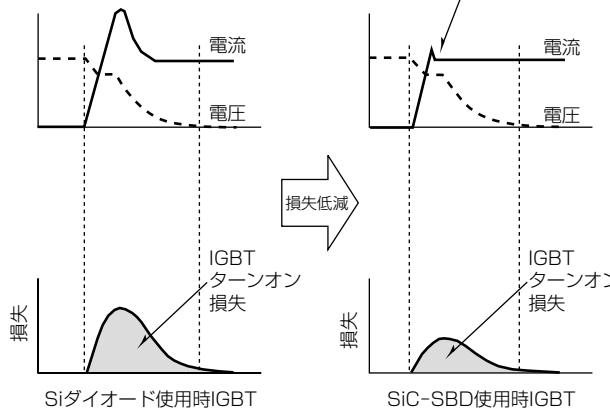


図3. IGBTターンオン波形と発生損失

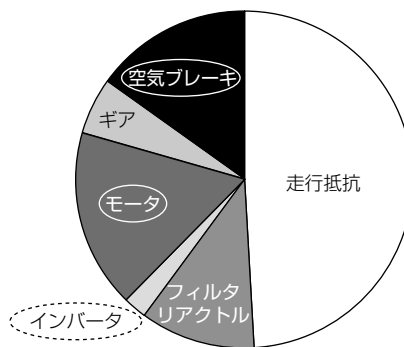


図4. 入力電力量に対する発生損失の内訳例

から、従来の主回路システムでSiパワーデバイスからSiCパワーデバイスに変更しても、SiCパワーデバイスの本来の機能が十分に活用できない。むしろ、“モータ”及び“空気ブレーキ”で多くの電力の消費がみられ、当社としては、SiCパワーデバイスを適用することによる、これらの電力消費の低減に着眼して開発・設計を進めた。

3.2 省エネルギー化の方策と設計

一般にインバータ電流及びスイッチング周波数の増加はパワーデバイスの発生損失を増大させるが、低損失を特長とするSiCパワーデバイスの使用によって、インバータ電流及びスイッチング周波数の増加が実現可能となった。

図5に従来のSiパワーデバイスを適用したインバータシステムのブレーキ時の性能曲線と今回のSiCパワーデバイスを適用したインバータシステムのブレーキ時の性能曲線を示す。従来のSi適用システムでは、高速領域で熱的及びモータ電流の制約によって回生ブレーキが制限され、空気ブレーキの補足で車両としてのブレーキ力を保っている。

一方、SiC適用システムでは、高速領域から回生ブレーキとして回生電力を向上させ、主回路システム全体としての省エネルギー効果を高めている。

図5の下のグラフのような回生動作を実現するためには、高速領域のブレーキ力上限値(停動トルク)を増加させるための低インピーダンスのモータ設計が必要となる(トルク

は電圧の二乗に比例し、周波数とインピーダンスの二乗に反比例する。)。そこで、今回開発したSiC適用インバータシステムに対応したモータでは、モータ電圧の速度比(V/F)が低くなるように設計した。必要なトルクを確保するためにSiC適用インバータシステムのモータ電流は従来のモータ電流に比べて高くなるが、SiCの特長である低損失である点を生かして、素子面積の増大を抑制し、インバータの小型化との両立を可能としている。さらに、パワーデバイスのスイッチング周波数を高く設定することによって、モータ自体の高調波損失も低減した(図6)。

このように、SiCパワーデバイスの低損失を生かし、低インピーダンスモータによる電力回生ブレーキの拡大及び高周波変調によるモータ損失の低減を可能とした。

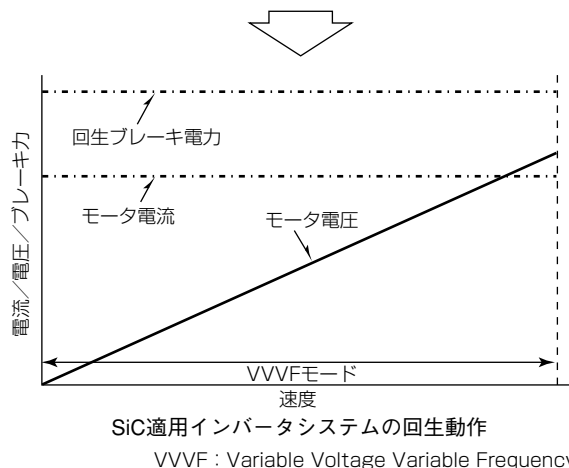
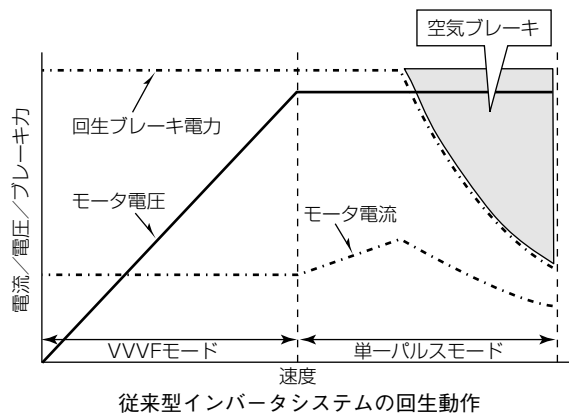


図5. ブレーキ時性能曲線

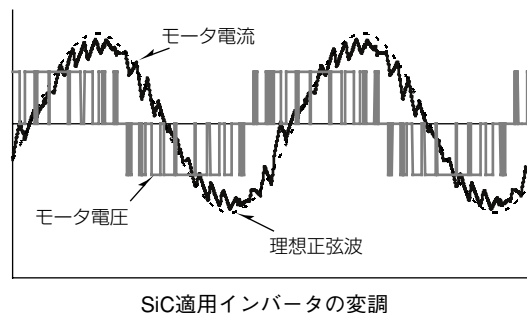
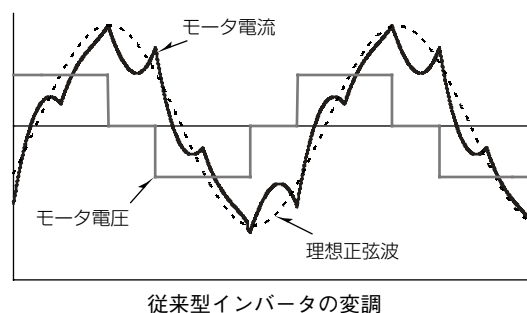
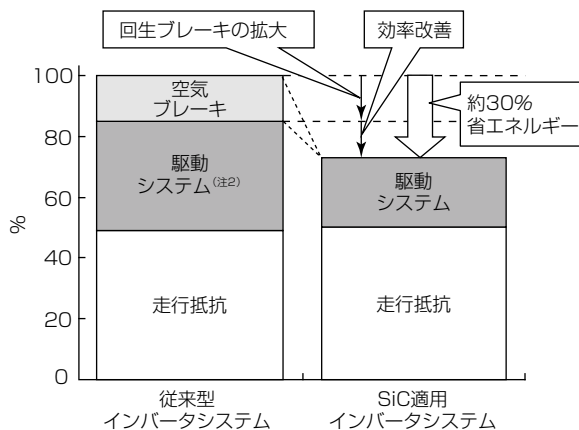


図6. 従来型とSiC適用時のモータ電圧・電流の比較



(注2) 駆動システム：フィルタリアクトル、インバータ、モータ、ギアを合わせた電力消費

図7. 電力消費量比較

3.3 シミュレーションによる評価結果

図7に実路線におけるランカーブシミュレーションから得られた電力消費量を示す。回生ブレーキ性能の向上によって、これまで空気ブレーキで消費されていた運動エネルギーが回生され、実消費電力量が低減される。さらに低損失であるSiCパワーデバイスによるインバータ電力損失の低減、高周波変調によるモータ損失の低減によって、駆動システムの消費も低減されている。SiCパワーデバイスによるこれら効率改善を適用した結果、鉄道車両用インバータのシステムの全エネルギー消費は30%の低減が期待できる。また、空気ブレーキの使用が低減することから、シューメンテナンスの低減も期待できる。

3.4 SiC適用インバータとモータの製品化

鉄道車両用として主回路システム全体での省エネルギー化の考え方に基づいて、最新のSiCパワーデバイスを用いた鉄道車両用インバータを開発した。図8に示すように搭載しているSiCパワーデバイスは、2組のSi-IGBT(1,700V/1,200A)及びSiC-SBD(1,700V/1,200A)で構成している。SiCパワーデバイスの低損失化と高温動作によってパワーデバイスの冷却面の大きさを低減でき、これによってインバータ箱の体積及び質量を低減できる。

今回開発したSiC適用インバータ装置は、従来Siパワー

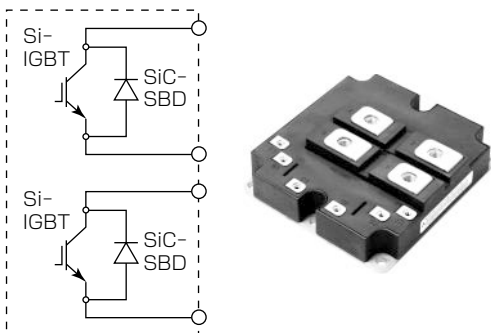


図8. SiCパワーデバイスの回路図と外観



図9. SiC適用インバータ装置

表1. 開発インバータの諸元

入力(架線)電圧	DC750V
主回路構成	2レベル電圧型PWMインバータ
モータ駆動容量	180kW級モータ×4台
冷却方式	走行風自冷

PWM: Pulse Width Modulation

デバイス適用のインバータ装置に対して体積、質量を40%低減した。製品化したインバータ装置の外観を図9に、装置仕様を表1に示す。

また、SiC適用インバータに対応したモータについては、モータ電圧の速度比(V/F)を低くすることで低インピーダンス設計が可能になり、体積を従来の開放型モータから増加させることなく全閉形化でき、高効率と省メンテナンス性を実現した。SiC適用インバータに対応した全閉形モータの外観を図10に示す。

このように、SiCパワーデバイスの適用によってインバータ装置の大幅な損失低減、小型・軽量化が実現できるとともに、さらに、先に述べた全閉形モータとの組合せによって、主回路システムの電力消費の大幅な削減が可能となる。

3.5 SiC適用インバータとモータの組合せ試験

SiC適用インバータ装置とモータの組合せ試験を実施し、従来型インバータシステムとの比較を行った。

図11は従来型インバータシステムでの動作チャートを示す。非同期変調から同期変調へとパルスモードが切り替わる際にモータ電流の跳ね上がりが見られる。

一方、図12に示すSiC適用インバータシステムでは、高周波スイッチングによる全領域非同期変調を適用し、パルスモードの切換えがないため、動作チャート内のモータ電流には電流の跳ね上がりはない。その結果、騒音を従来型インバータシステムに比べ6デシベル低減できた。

4. 補助電源装置の最新技術とSiCパワーデバイス適用時の期待

4.1 小型・軽量化への方策

図13に示すように、補助電源装置は入力の高圧回路と出力の低圧回路との絶縁のために商用周波のトランスを適用しており、このトランスが装置の小型化・軽量化の妨げとなっていた。

この対策としては、図14に示すような直流中間リンク回路で一旦、DC-DCコンバータで入出力を絶縁する高周波リンク方式が有効となる。この方式は、DC-DCコンバータ部を高周波スイッチングすることによってトランスの小型・軽量化が図れる一方、高周波化によるパワーデバイ



図10. SiC適用インバータ対応全閉形モータ

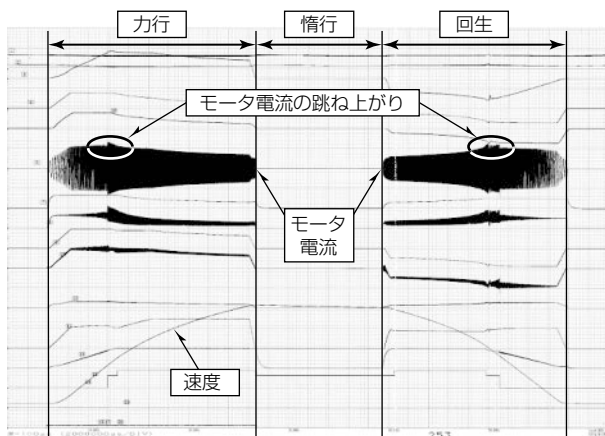


図11. 従来型インバータシステムでの動作チャート例

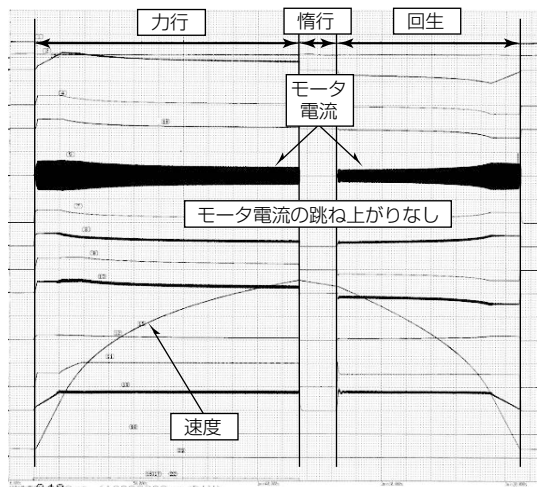


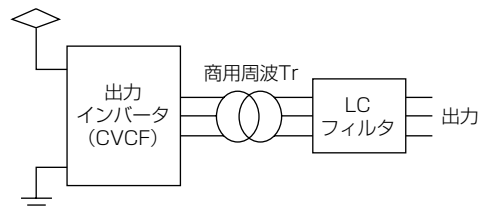
図12. SiC適用インバータシステムでの動作チャート例

スのスイッチング損失の増大によって、装置効率が低下する、又は冷却器が大型になるという課題があり、大容量の補助電源装置への適用が困難であった。しかし、スイッチング損失の少ないSiCパワーデバイスの適用によって、冷却器の大型化が不要となるとともにトランスの小型・軽量化が実現でき、大容量の補助電源装置でも、一層の小型・軽量化が見込める。

4.2 高効率化・高信頼性への方策

補助電源装置は冗長性を考慮して車両編成内に2台以上搭載されるのが一般的で、一台が故障した場合に健全な他方によって車両編成内の電源が確保される。冗長性確保の方式としては、大きく分けて延長給電方式と並列同期運転方式とに分けられる。

その中の一つとして、当社は、各装置を独立して運転しつつ出力電圧・周波数を同期制御する自律分散型並列同期制御による並列運転を提案している。この方式は、装置間の同期制御線が不要という特長があり、回路構成の簡素化によって電源確保の信頼性を向上させることができる。さらに、補助電源装置は軽負荷時に電源効率が低下する傾向にあるため、暖房・冷房を必要としない軽負荷時には並列



CVCF : Constant Voltage Constant Frequency
LCフィルタ : コイル(L)とコンデンサ(C)によるローパスフィルタ

図13. 従来型補助電源装置

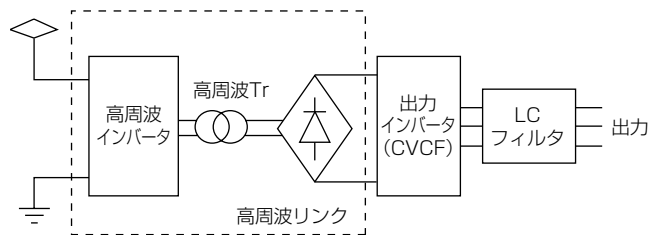


図14. 高周波リンク型補助電源装置

運転台数を制限し、車両編成全体として常に高効率の状態での運転制御する軽負荷休止制御も提案している。この方式によって、車両編成内における補助電源システム全体としての高効率化が期待できる。

5. む す び

当社における最新のパワーデバイスであるSiCパワーデバイスの長を述べるとともに、それを適用した鉄道車両用インバータと高効率モータとの組合せによる主回路システム全体としての省エネルギーを実現するための技術、及び補助電源システムの最新技術とSiCパワーデバイス適用時への期待について述べた。

地球規模での更なる環境負荷低減及び省エネルギー化が求められる中、鉄道システムに対する期待は大きく、鉄道車両用インバータシステム及び補助電源装置の適用拡大が考えられる。

当社としては、鉄道という高効率大量輸送手段をこれまで以上に環境に優しいものとするために、SiCパワーデバイスの更なる高性能化を進め、それを適用した鉄道車両用インバータと高効率モータを組合せた主回路システム、SiCパワーデバイスによって小型化した鉄道車両用インバータ装置及び補助電源装置の製品化を展開していく。

参 考 文 献

- (1) 中山 靖, ほか : SiC-SBD適用インバータによる鉄道車両用電動機評価, 2010年電気学会全国大会講演論文集, 4-139 (2010)
- (2) 生方伸幸, ほか : SiCパワーモジュール適用鉄道車両用インバータシステムの省エネルギー運転について, 2011年電気学会全国大会講演論文集, 5-078 (2011)