

SiCパワーモジュールの主回路素子への適用技術

菅原徹大*
山下良範*
中嶋幸夫*

Application Technologies of SiC Power Module for Railcar Inverter

Tetsuo Sugahara, Yoshinori Yamashita, Yukio Nakashima

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の整備が進んでいる。

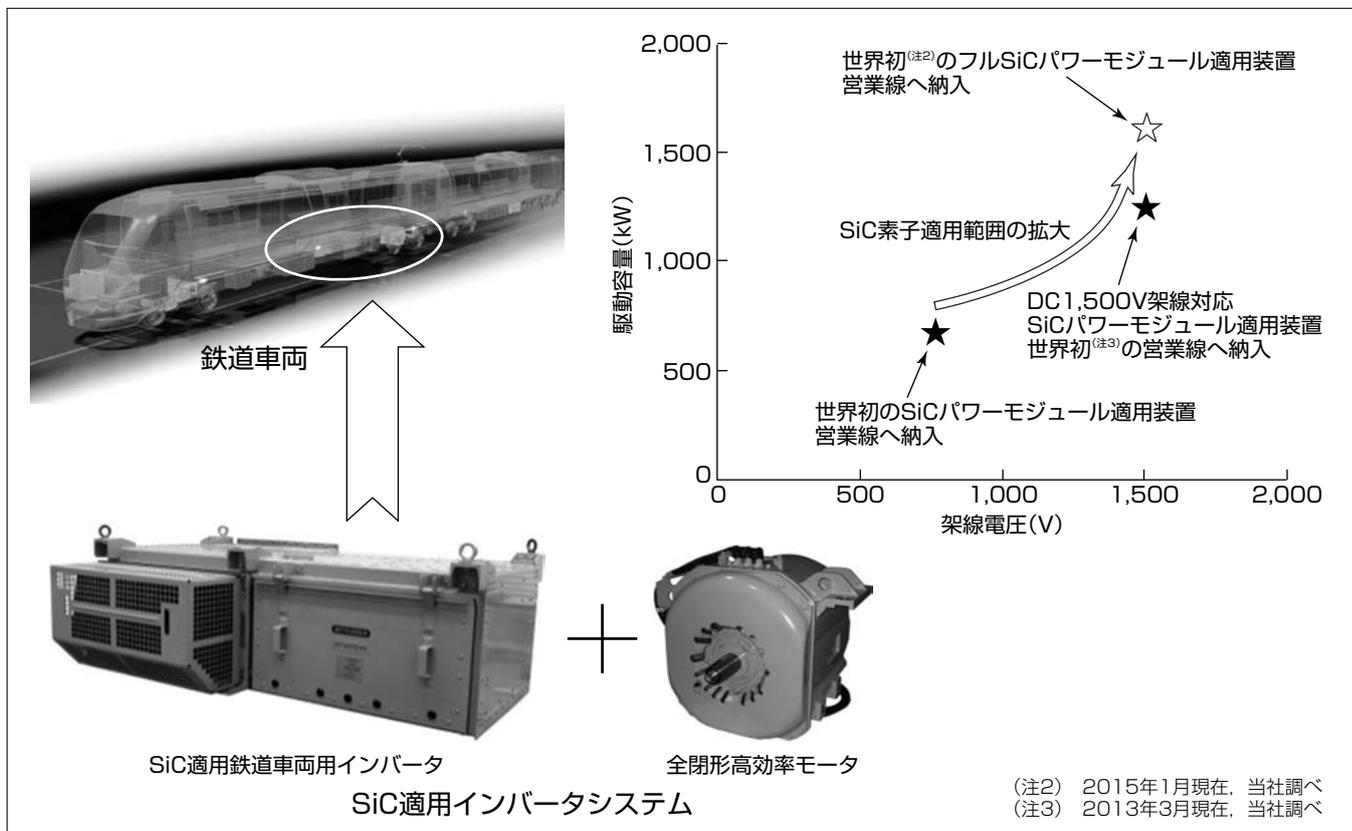
三菱電機は、2012年2月に世界初^(注1)のハイブリッドSiC(シリコンカーバイド)パワーモジュールを適用した推進制御装置を営業線に納入したことを皮切りに、国内外の推進制御装置・補助電源装置に多数適用している⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。ハイブリッドSiCパワーモジュールの適用によって、電力回生ブレーキ領域の拡大、高周波スイッチングによるモータ損失の低減など、主回路システム全体としての省エネルギー化や、小型化に寄与している。

SiC素子は低損失・高温動作の特長を持ったSi素子に変わるキーデバイスであるが、従来のハイブリッドSiCパワーモジュールでSiC化したダイオードに加え、スイッチング素子もSiC化した。具体的には、従来の“Si-IGBT”か

ら“SiC-MOSFET”化したフルSiCパワーモジュールを開発し、更なる省エネルギー化、装置の小型化を実現した。フルSiCパワーモジュールは3.3kV定格のパワーモジュールであり、1.7kVハイブリッドSiCパワーモジュールで実現できなかった1,500V架線システムでの2レベルインバータを実現できた。

鉄道車両用主回路システムのインバータ、モータ、空気ブレーキ等の機器に対して、フルSiCパワーモジュール適用などの省エネルギー施策を適用した最適設計によって、従来の主回路システムに対して約30%の消費電力低減を実現した。また、交流架線システム向け補助電源装置にフルSiCパワーモジュールを適用することで高効率化・小型軽量化を実現した。

(注1) 2012年2月現在、当社調べ



フルSiCパワーモジュール適用インバータシステム

3.3kV/1.5kAの大容量SiCパワーモジュールの適用によって、回生ブレーキ性能が向上した。Siパワーモジュール適用従来装置と比較してインバータ損失が低減した。SiCパワーモジュールの高周波スイッチング駆動によってSiC対応のモータの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約30%の省エネルギーを実現した。

*伊丹製作所

1. ま え が き⁽⁴⁾

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いる。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2012年2月に世界初のハイブリッドSiCパワーモジュールを適用した推進制御装置を営業線に納入したことを皮切りに、国内外の推進制御装置・補助電源装置に多数適用し、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り組みとして、フルSiCパワーモジュール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、世界に先駆けて製品化した。

本稿では、フルSiCパワーモジュールの特長を述べるとともに、SiC素子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・装置の小型化について述べる。また、補助電源装置についても、フルSiCパワーモジュールの適用事例について述べる。

2. フルSiCパワーモジュールの特長⁽⁵⁾

図1に、Si-MOSFETとSiC-MOSFETの構造を示す。SiCはSiと比較し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、半導体を薄くすることができる。これによって、従来のSiに比べ大幅なオン抵抗低減を実現でき、その結果、導通損失の低減が可能となる。

また、従来のSi-SBD(ショットキーバリアダイオード)では漏れ電流が大きく、高耐圧化ができなかった。しかし、SiC-SBDを採用することで高耐圧化が可能となり、ダイオードのリカバリー損失が低減され、スイッチング素子のターンオン損失の低減が可能となった(図2、図3)。さらに、スイッチング素子にSiC-MOSFETを採用することで、従来のSiダイオードでの逆回復が存在せず、ターンオフ時のテール電流がなくなることでターンオフ損失の大幅な低減が可能となり(図4)、従来比55%のインバータ損失を低減できる(図5)。

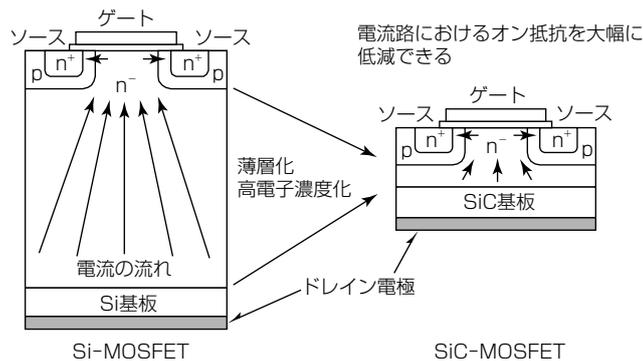


図1. MOSFET構造の比較

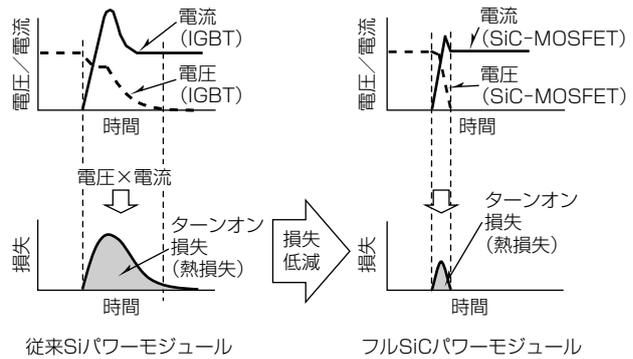


図2. トランジスタターンオン波形比較

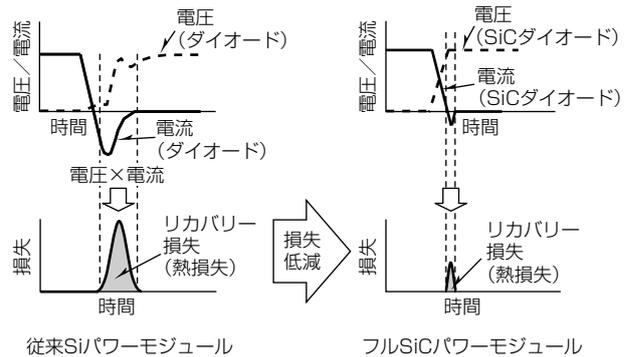


図3. ダイオードターンオフ波形比較

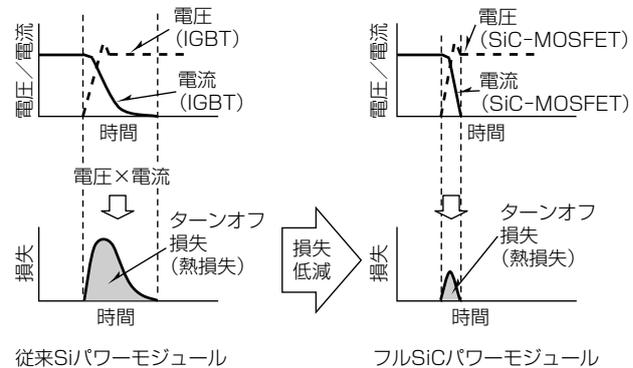
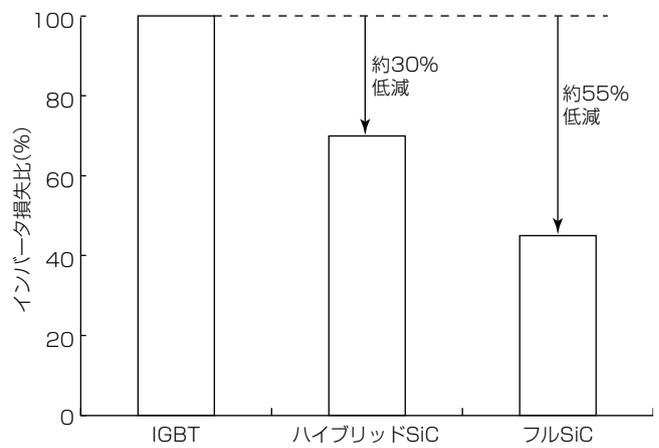


図4. トランジスタターンオフ波形比較



(注4) 同一電流・電圧・キャリアにおける動作時の損失を比較

図5. インバータ損失比較

3. フルSiCパワーモジュール適用の効果

3.1 鉄道車両における消費電力の分析

2章で述べたとおり、フルSiCパワーモジュールを適用することによって、従来のSiパワーモジュール適用と比較して、インバータ電力損失が約55%低減することが分かった。

しかし、従来の鉄道車両用主回路システムでの入力電力量に対する発生損失の内訳によると、図6に示すように、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。このことから、従来の主回路システムでSi素子からSiC素子に変更しても、フルSiCパワーモジュール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消費が見られる。当社は、フルSiCパワーモジュールを適用したときのこれらの電力消費の低減に着目して機器の開発・設計を進めた。

3.2 省エネルギー化の方策と設計

インバータへのフルSiCパワーモジュール適用に当たり、主回路消費電力の分析を行い、機器ごとに次の項目をターゲットにして省エネルギー施策を適用することにした。

- (1) インバータ：スイッチング損失低減によるインバータ損失を低減させる。
- (2) モータ：高周波スイッチング、及びモータ構造最適化によるモータ損失を低減させる。
- (3) 空気ブレーキ：回生ブレーキ領域の拡大による回生性能を向上させる。

モータ高調波損失の観点からは、非同期パルスモードの適用速度域拡大による高周波スイッチングでの正弦波駆動が適している。しかし、主回路システム全体の損失を最小化する施策を検討した結果、モータの基本波損失も無視できない大きさになることが判明した。そこで、同期多パルス変調を適用することでモータの電圧利用率を向上させて、従来の変調方式と比較してモータ電流を低減し、インバータ損失の低減とモータ基本波損失の低減を両立させることに成功した(図7)。さらに、回生ブレーキ領域の拡大も図

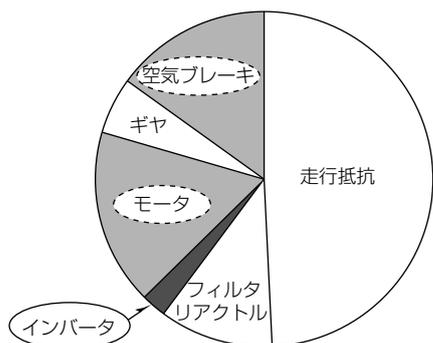


図6. 入力電力量に対する発生損失の内訳例

ることで、モータ、空気ブレーキを含めた主回路システム全体の最適設計によって、シミュレーション上で既存の主回路システムと比較して約30%の消費電力低減効果が見込めることを確認した。

3.3 実案件への適用

フルSiCパワーモジュールを適用したインバータ(図8)の開発後、多くの鉄道事業者に採用された(表1)。その結果、既存車に対し、装置の体積・質量を40%以上低減することに成功した。車両全体の消費電力についても、現車試験の結果、既存車に対して約40%改善することを確認した。

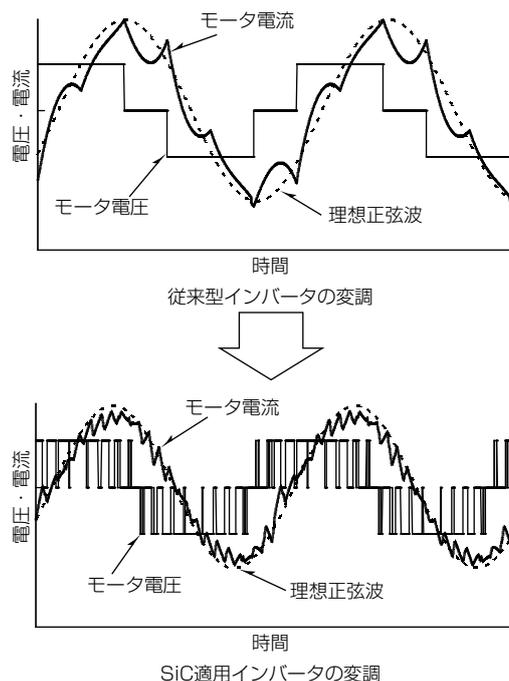


図7. 従来型とSiC適用時のモータ電圧・電流の比較

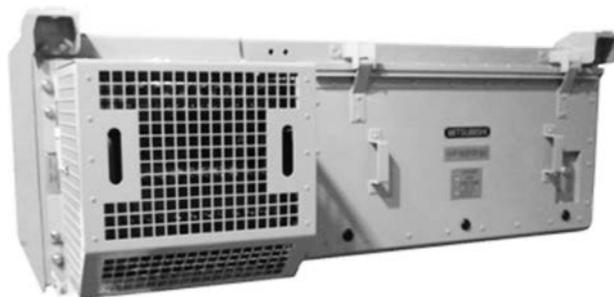


図8. フルSiC適用インバータ

表1. フルSiCインバータ納入実績

事業者	納入台数(台)
A社	3
B社	6 (80)
C社	3 (18)
D社	3 (72)
E社	2 (4)
F社	2 (16)
G社	3 (9)

()内は出荷予定数

4. 補助電源装置の最新技術とSiC適用時の期待

図9に交流架線システム向け補助電源装置の回路構成を示す。電力変換部であるコンバータ・インバータ部と交流入力リアクトル、正弦波を出力するための交流出力リアクトル及び交流フィルタコンデンサから構成される。このコンバータ・インバータ部にフルSiCパワーモジュールを適用して電力損失の低減を図った。低損失の1.2kV定格フルSiCパワーモジュールを適用するため、中間リンク回路構成の最適化を行い、中間リンク電圧をDC700Vに設定している。また、各回路のスイッチング周波数を従来装置に対し各々で約5倍、約2倍に高周波化することで、交流リアクトルのインダクタンス値と交流フィルタコンデンサ容量の低減と、高調波電流の低減による出力フィルタ回路の損失低減によって出力フィルタ回路の小型・軽量化を図った。図10にフルSiCパワーモジュールを適用した補助電源装置の外観を示す。

ハイブリッドSiCパワーモジュールを適用した類似の補助電源装置に対し、フルSiCパワーモジュールを適用することで、次の改善を確認できた。

- (1) 装置損失を装置全体で40%低減
- (2) 装置効率を95%から97%に向上
- (3) フィルタ回路外形を70%小型化

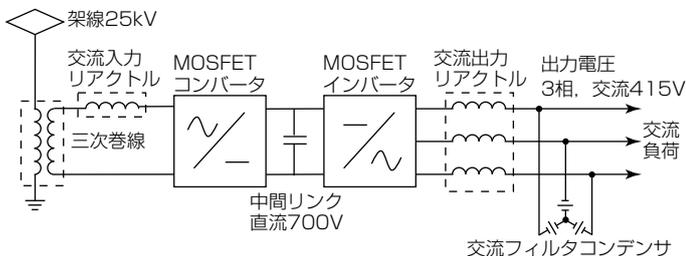


図9. 交流架線システム向け補助電源装置の回路構成



図10. フルSiC適用の補助電源装置

これらのおり、交流架線システム向けの補助電源装置に対してフルSiCパワーモジュールを適用し、装置の高効率化・小型軽量化を実現した。今後、更なる大容量の補助電源装置や直流架線システム向けの補助電源装置にもフルSiCパワーモジュールの適用を拡大していく。

5. む す び

最新のパワーモジュールであるフルSiCパワーモジュールの特長を述べた。また、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パワーモジュール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み合わせた主回路システム、SiCパワーモジュール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。

なお、この内容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)の委託研究の成果の一部を活用している。

参 考 文 献

- (1) 根来秀人, ほか: SiCパワーモジュール適用鉄道車両用の高効率インバータシステム, 平成24年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 65~68 (2012)
- (2) 山下良範: SiCパワーモジュールを用いた鉄道車両用インバータシステムの開発, 鉄道車両工業, No.462 (2012)
- (3) 山下良範, ほか: SiCパワーモジュールを用いた鉄道車両用主回路システムの開発, 日本鉄道技術協会誌, 55, No.9, 37146~37149 (2012)
- (4) 山下良範, 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, 平成24年電気学会全国大会論文集, 5-0778 (2012)
- (5) 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駆動評価, 平成22年電気学会全国大会論文集, 4-139 (2010)