

鉄道車両用推進制御システムの最新動向

村端章浩*
田中孝典*

Latest Trend of Propulsion Control System for Railway Vehicle

Akihiro Murahashi, Takanori Tanaka

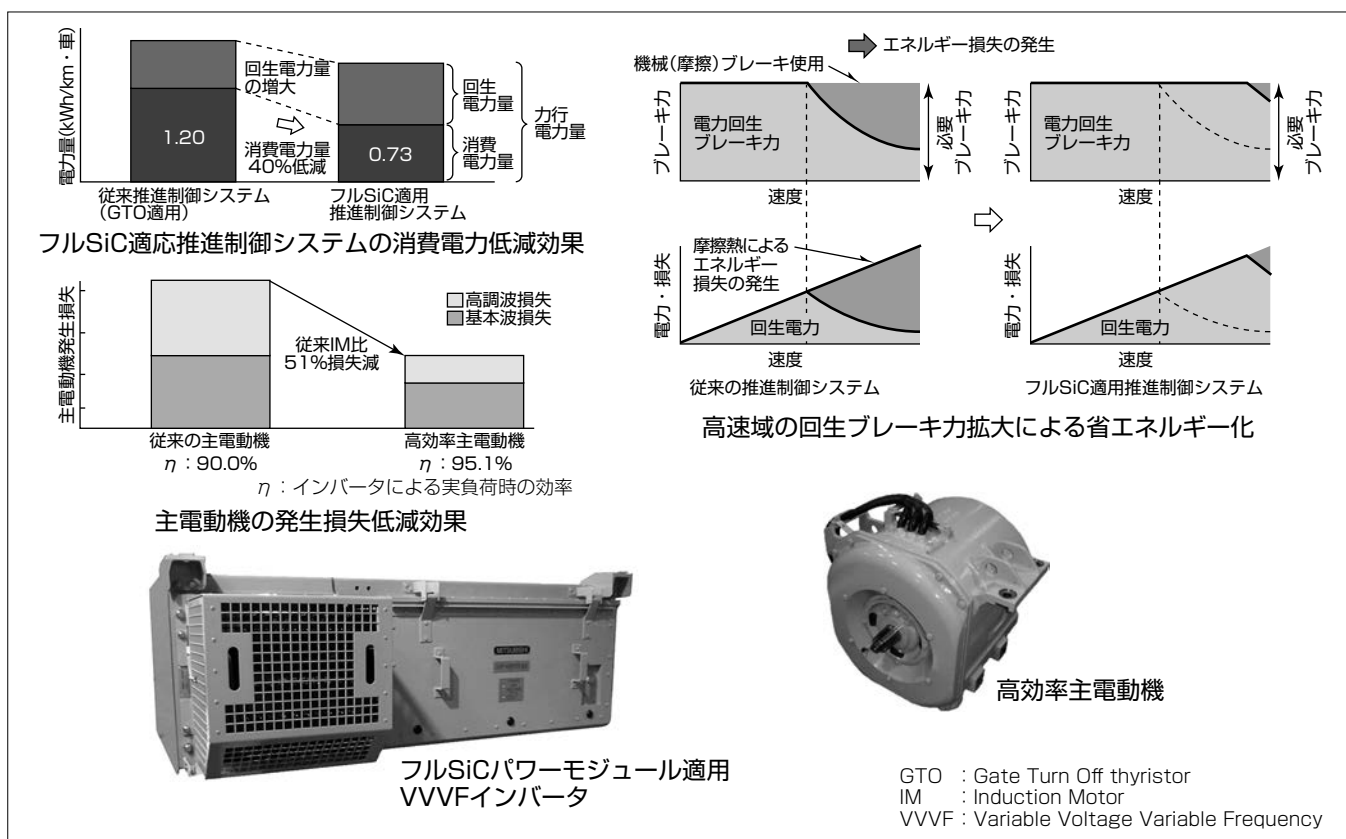
要旨

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、環境負荷の少ない輸送手段である鉄道の重要性が高まっている。その需要に対応するため、国内外で鉄道インフラの整備が進んでいる。

三菱電機は、SiC(シリコンカーバイド)パワーモジュールを鉄道車両用推進制御システムに適用することによって推進制御システム全体として省エネルギー化に取り組み、

環境負荷の低減に寄与してきた。

当社のSiCパワーモジュールを適用した鉄道車両用推進制御システムは、フルSiC(ダイオード、スイッチング素子ともSiC化)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主電動機の高効率化など、既存システムに対して約40%の消費電力低減を達成した。



従来の推進制御システムとフルSiCパワーモジュール適用推進制御システムの比較

フルSiCパワーモジュールをVVVFインバータに適用し、フルSiCの特長に合わせて設計した主電動機と組み合わせて用いることによって、推進制御システムとして既存システムに対して約40%の消費電力低減を達成した。

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いる。その対策の一つとして、環境負荷の少ない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^(注1)のハイブリッドSiC(ダイオード素子をSiC化)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。

本稿では、当社のSiCパワーモジュールを適用した推進制御システムの進展及び最新技術であるフルSiCパワーモジュールの特長を述べるとともに既存システムに対して約40%の消費電力低減を達成した、フルSiCパワーモジュール適用鉄道車両用推進制御システムの省エネルギー技術について述べる。

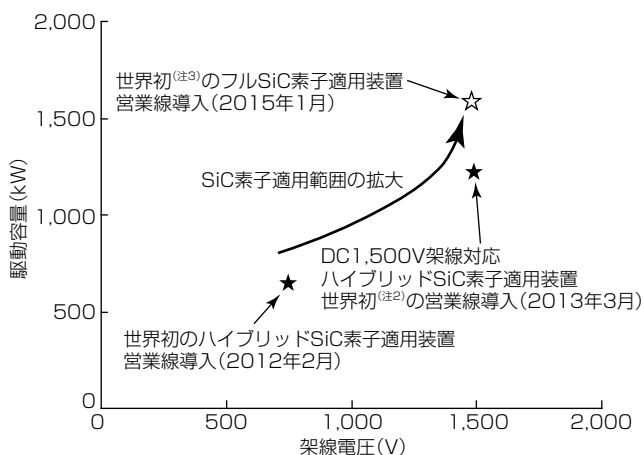
(注1) 2012年2月現在、当社調べ

2. SiC適用推進制御システムの進展⁽¹⁾

低損失を特長とするSiCパワーモジュールを使用することで、従来よりもインバータ電流と変調周波数を増加させることができ、これまで鉄道車両用推進制御システムの省エネルギー化に寄与してきた。図1に、当社のSiCパワーモジュール適用推進制御システムの進展を示す。

2012年2月から、ハイブリッドSiCパワーモジュールを適用した推進制御システムが直流750/600V架線対応のシステムとして世界で初めて営業運転に適用され、Si(シリコン)パワーモジュールを適用した従来のシステムと比較し、ブレーキ方式の変更と合わせて38%の省エネルギー効果を上げている。

さらに、2013年3月から直流1,500V架線に適用対象を拡大し、従来のSiパワーモジュールを適用したシステムと



(注2) 2013年3月26日現在、当社調べ
(注3) 2015年6月22日現在、当社調べ

図1. SiCパワーモジュール適用推進制御システムの進展

比較し、ハイブリッドSiCパワーモジュールを適用したシステムとして24%の省エネルギー効果を上げている。

また、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フルSiCパワーモジュールを適用した直流1,500V架線対応の推進制御システムを開発し、2015年1月から営業運転に適用され、約40%の省エネルギー効果が得られることを確認した。

以上のように、当社製品はSiCパワーモジュールの適用範囲を拡大させており、環境負荷の低減に寄与している。

3. フルSiCパワーモジュールの特長

図2に、Si-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)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(ドリフト層)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、導通損失の低減が可能になる。

また、バンドギャップの広いSiCでは、ショットキー接合のエネルギー障壁を大きくとれるため、高耐圧のSi-SBD(Schottky Barrier Diode)が実現できる。これによって、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になった。さらに、スイッチング素子にSiC-MOSFETを採用することで、従

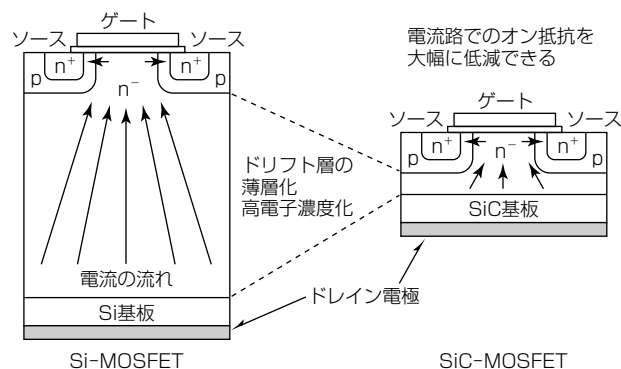
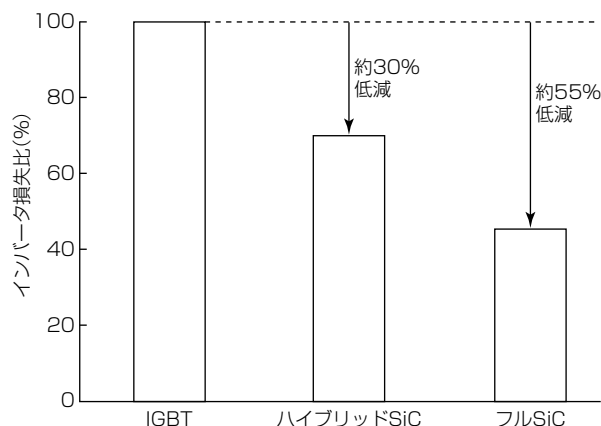


図2. MOSFET構造の比較



(注4) 同一電流・電圧・キャリアでの動作時の損失を比較

図3. インバータ装置発生損失比較

来のIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)デバイスでの少数キャリアが存在せず、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になり、インバータ損失を従来比で55%低減できる(図3)。

4. フルSiC適用推進制御システム

4.1 消費電力の分析

図4に、車両が走行する場合のエネルギー変換フローと車両の発生損失を示す。

発生損失は、エネルギー変換時に各機器で発生する発熱損失に加え、走行抵抗及び減速時での摩擦ブレーキで熱エネルギーとして消失させる損失に分類される。鉄道車両の消費電力量を低減させるには、これら全ての損失に着目する必要がある。

図4の円グラフに、発生損失の内訳例を示す。走行機器に関連する発生損失のうち、回生できずに消失した摩擦(空気)ブレーキでの熱損失及び主電動機で発生する熱損失など、回生可能なエネルギー損失が多くを占める。

一方、インバータ装置のエネルギー損失は、鉄道車両全体の発生損失に対して占める割合が低いことから、単にSi素子からSiC素子に変更するだけでは、車両全体として、大幅な発生損失低減は期待できない。そこで、インバータ装置の損失低減に加えて、回生ブレーキ性能の拡大による

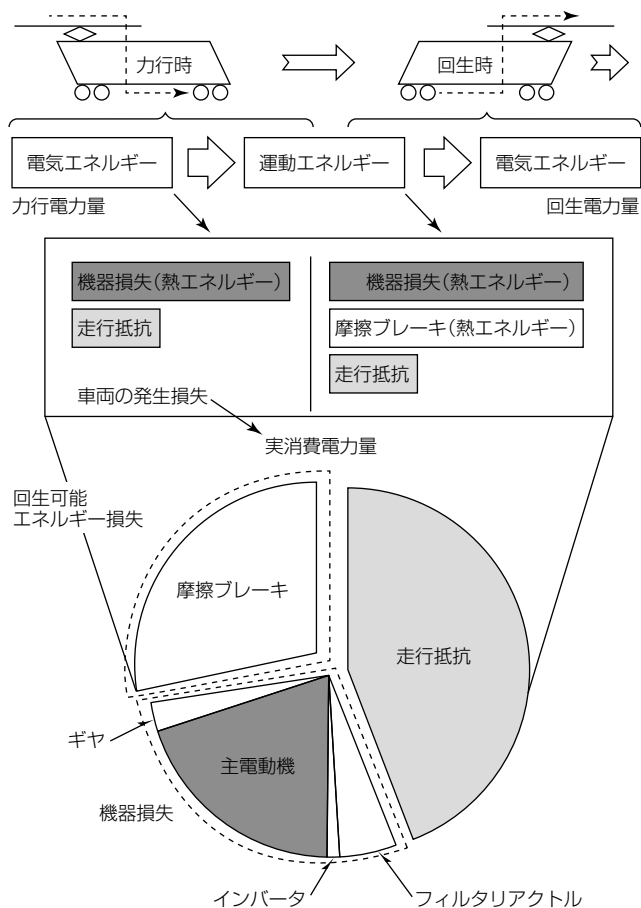


図4. 鉄道車両の発生損失(消費電力量)とその内訳

摩擦ブレーキの動作領域の縮小及び主電動機の高効率化に取り組んだ。

4.2 省エネルギー化の方策⁽²⁾

4.2.1 回生ブレーキ領域の拡大

回生ブレーキ性能を増加させて摩擦ブレーキの動作領域を減らすために、推進制御システムとして次の二つの取組みを行った。

(1) VVVFインバータ装置

従来のSiパワーモジュールを適用したインバータ装置では、素子損失の制約で、高速領域では、主電動機電流を増加させることが困難なため、回生ブレーキ性能が特に速度の高い領域で制限され、摩擦ブレーキを補足することによって車両としての減速度を確保していた。

一方、SiCパワーモジュールを適用したインバータ装置では、先に述べたように素子損失が大幅に低減されるので、図5に示すように、高速領域でも従来以上に主電動機電流を高く設定することができ、回生ブレーキ性能を増加させることが可能になる。

(2) 主電動機

インバータ装置で実現できる高速領域の大電流化に対応し、主電動機については、回生可能な運動エネルギーを回生できるように最大出力(停動トルク)を増加させ、回生ブレーキ性能を向上させる設計を行った(図6)。

このように、これまで回生できずに熱エネルギーとして消失していた運動エネルギーを回生することによって、車両の発生損失を約25%低減させることができた(車両の構成によって低減割合は前後する)。

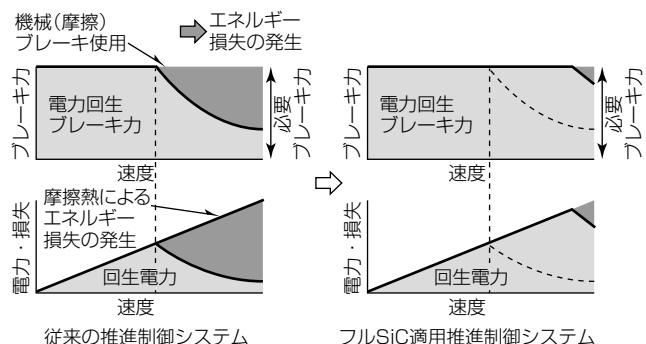


図5. 高速域の回生ブレーキ力拡大による省エネルギー化⁽²⁾

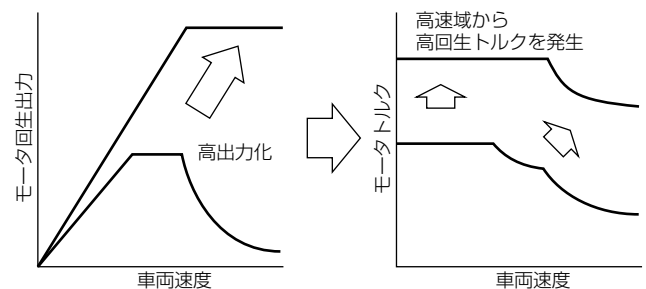


図6. 主電動機の発生出力向上と高トルク化イメージ

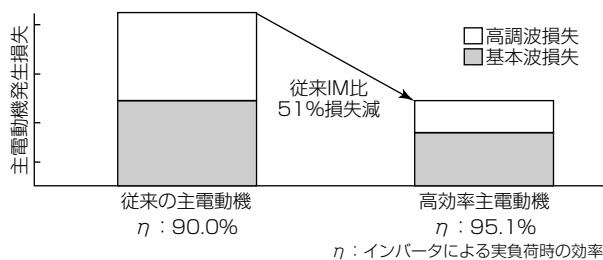


図7. 主電動機の発生損失低減効果

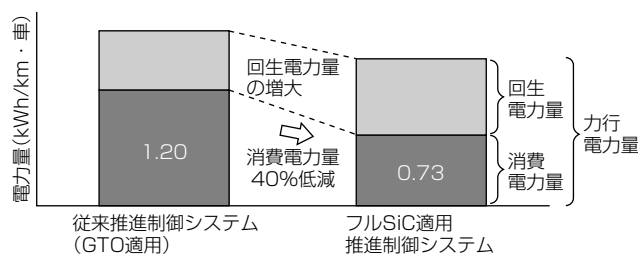


図10. 営業運用での消費電力低減効果⁽¹⁾

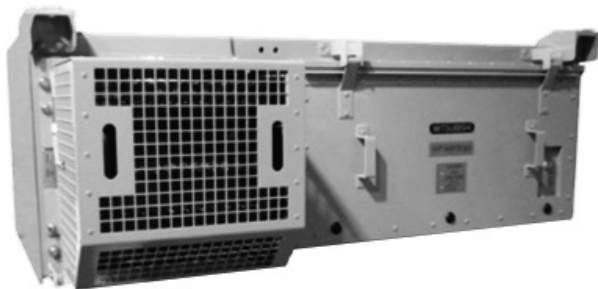


図8. フルSiCパワーモジュール適用VVVFインバータ



図9. 高効率主電動機

4.2.2 主電動機の高効率化

インバータ装置にSiC素子を適用することによって、主電動機電流を高く設定できるだけでなく、低損失の特性を活用して、スイッチング周波数を高く設定できる。その特性を踏まえた上で、主電動機設計として、次の(1)~(4)に着目して最適設計を実施した。

- (1) 回転子スロット形状の最適化
- (2) 導体断面積の増加
- (3) 高調波損失の抑制
- (4) 低損失材料の適用

その結果、図7に示すように、基本波損失及び高調波損失とも低減し、主電動機の発生損失を51%削減した。

主電動機の発熱損失の低減には、主電動機を駆動するインバータ装置との連携が不可欠であり、SiC素子の特性を活用した最適な電流・電圧制御によって、推進制御システムとして、発生損失を10%低減した。

4.3 実案件への適用⁽¹⁾

フルSiCパワーモジュールを適用した直流1,500V架線対応のVVVFインバータ(図8)と高効率主電動機(図9)は、開発後、多くの鉄道事業者者に採用された。実車による走行試験の結果、既存車のGTOインバータ制御装置搭載推進制御システムに対し、車両全体の消費電力が約40%低減されることを確認した(図10)。

5. む す び

SiCパワーモジュール適用鉄道車両用推進制御システムの進展を述べるとともに、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主電動機との組合せによる、推進制御システムの省エネルギー化を実現するための技術と実案件への適用結果について述べた。

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、鉄道車両用推進制御システムの適用拡大が考えられる。当社としては、高効率大量輸送手段である鉄道システム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主電動機を組み合わせた推進制御システムの製品化を展開していく。

なお、SiCパワーモジュールの開発には国立研究法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究成果の一部を活用している。

参考文献

- (1) 中口勝己, ほか: DC1,500V架線対応フルSiC適用VVVFインバータ装置実証結果について, 鉄道車両と技術, 21, No.5, 10~14 (2015)
- (2) 大橋 聡, 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, 第49回鉄道サイバネシンポジウム, No.505 (2012)