

SiCを用いた鉄道車両用インバータの開発

石川 勝美
Ishikawa Katsumi

寺澤 清
Terasawa Kiyoshi

坂井 俊文
Sakai Toshifumi

杉本 慎治
Sugimoto Shinji

西野 尊善
Nishino Takayoshi

鉄道輸送システムは、自動車や飛行機などの他の輸送手段に比べ、環境負荷の小さいシステムである。鉄道車両の駆動システムは、パワーエレクトロニクスのコア技術であるパワーデバイスの進歩や、モータの高効率化により、高性能、高効率、小型・軽量、高信頼化が図られてきた。日立は、新材料のSiCを用いた低損失なパワーデバイスを適用した小型なインバータ装置と、モータの高調波損失

を低減したモータ構造、PWM制御方式の開発、走行パターンの改善により、省エネルギーな主回路システム・駆動システムを実現する。

これらの開発により、鉄道会社の省エネルギーのニーズに応えるとともに、さらなるグローバル展開を進め、環境性・快適性・安全性に優れた鉄道システムを提供していく。

1. はじめに

近年、環境に対する世界的な意識の高まりから、温暖化防止のためのCO₂削減や、内燃機関の排出ガスによる大気汚染抑制のための電動化など、省エネルギー化への要求が一段と高まってきている。このため、自動車や飛行機など他の移動手段に比べて格段に効率の高い鉄道の役割が重要になってきている¹⁾。

鉄道車両の駆動システムは、パワーエレクトロニクスのコア技術であるパワーデバイスの進歩や、誘導電動機の高効率化により、高性能、高効率、小型・軽量、高信頼化が図られてきた。インバータ装置などの駆動システムの小型化を実現するためには、低損失なパワーデバイスの適用が重要であり、Si (Silicon) を基材とするパワーデバイスに代わり、新材料のSiC (Silicon Carbide: 炭化ケイ素) を用いた低損失なパワーデバイスの適用が拡大してきている。

また、駆動システムの高効率化のためには、誘導電動機の回生領域の拡大や、高調波損失を低減する構造、PWM (Pulse Width Modulation) 方式の適用などが重要である。また、走行パターンの改善も必要となる。

本稿では、これらの課題に応える小型化・省エネルギー技術について報告する。

2. SiCパワーデバイスを用いた小型インバータシステム

2.1 パワーデバイスの変遷とSiCデバイスの特徴

鉄道車両の駆動システムの小型化は、パワーデバイスの進歩、高密度実装、冷却性能向上、周辺部品の小型化によって図られてきた。パワーデバイスは、1980年代半ばにSiを基材とする4.5 kV GTO (Gate Turn-off) サイリスタを用いたGTOインバータが登場したが、その後、2 kVを超える高耐圧のIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が開発され、日立は、世界に先駆けて、IGBTを適用したインバータを東京地下鉄株式会社日比谷線で製品化した²⁾。

現在では、3.3 kV、4.5 kV、6.5 kVの高耐圧のIGBTモジュールが製品化³⁾されている。そして、近年、新材料のSiCを用いた低損失なパワーデバイスの開発が進められている。SiCはSiより絶縁破壊電界が大きいいため、素子の厚さを $\frac{1}{10}$ に低減できる。その結果、導通時の素子の抵抗は、理論上2桁以上小さくすることが可能である。このため、パワーデバイスの小型化に寄与し、インバータ装置の小型化、冷却系の簡素化が期待されている。

2.2 SiC応用小型インバータ

日立は、世界に先駆けて、鉄道用のSiC-SBD (Schottky Barrier Diode) の開発に着手した^{4)~6)}。国内では、約90%を1.5 kV架線が占めており、世界的にも1.5 kV架線は多

表1 | インバータの体積削減の施策

SiCモジュールと冷却器の小型化、部品点数の削減で、インバータを小型化する。

課題	開発内容
回路構成の シンプル化・小型化	1,500 V架線で2レベル制御を可能とするため、 耐圧3.3 kVのSiCダイオードを開発
IGBTモジュールの 低損失化	SiC-SBD採用によるスイッチング損失低減 ソフトゲート制御技術の導入 IGBTの損失低減
冷却効率の向上	風上と風下の温度差を最小化する冷却構造
内装部品の小型化	周辺部品点数の削減

注：略語説明 SiC (Silicon Carbide), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), SBD (Schottky Barrier Diode)

い。1.5 kV架線では、3.3 kV耐圧のデバイスを用いれば2レベルの主回路構成を実現でき、1相に必要なデバイス数は3レベルの6個に対して2個となり、主回路の構成が簡単になる。

インバータ体積の削減の施策について、表1に示す。

インバータには、SiC-SBDの採用と、IGBTの損失を低減するソフトゲート技術の採用により、スイッチング損失を低減するとともに、さらにはIGBTの性能も改善することで、損失を35%低減した(図1参照)^{7), 8)}。

SiCモジュールの損失低減により、SiCモジュールの小型化を実現した。3.3 kV/1,200 Aの従来IGBTモジュールとSiCモジュールの比較を図2に示す。同じ出力密度で、実装面積を約 $\frac{2}{3}$ に低減した。

また、パワーデバイスの冷却効率を改善する冷却方式も併せて開発し、インバータ内装の部品点数の削減により、

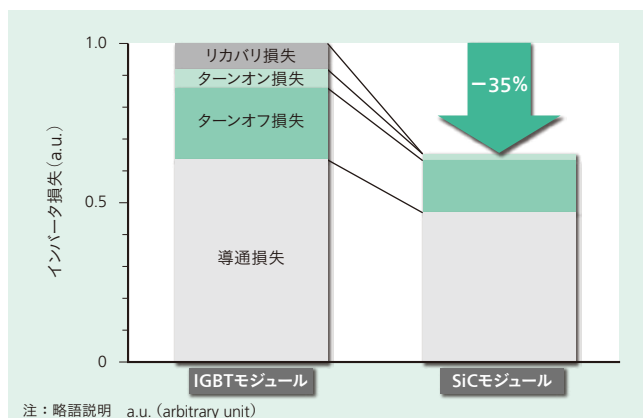


図1 | IGBTモジュールとSiCモジュールのトータル損失比較

SiCダイオードの採用、IGBTの性能改善、ソフトゲート駆動技術の採用で、損失を35%低減する。

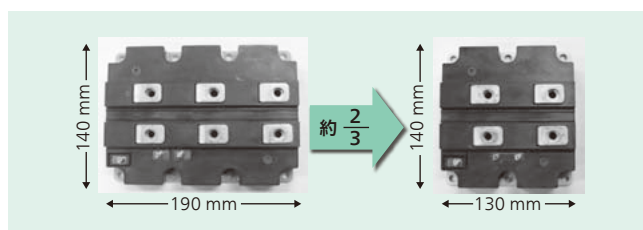


図2 | IGBTモジュールとSiCモジュールの外観

同じ出力密度で、実装面積を約 $\frac{2}{3}$ に低減する。

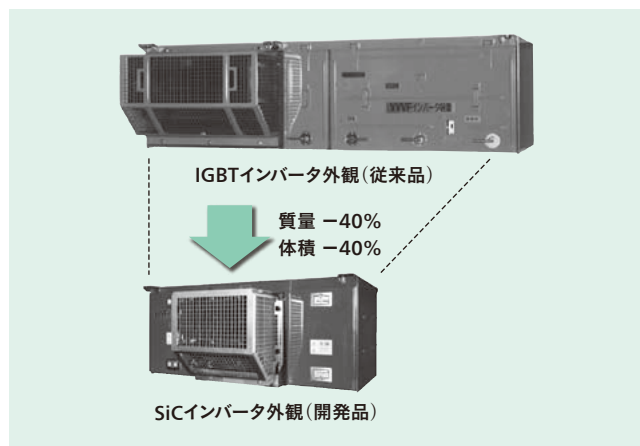


図3 | 従来IGBTインバータと開発したSiCインバータの外観

インバータの質量、体積を40%低減する。

インバータの40%小型化、軽量化を実現した(図3参照)。

3. 高効率駆動システム開発

3.1 高効率駆動システム

高効率駆動システムの実現のためには、空気ブレーキを最小化する回生領域の拡大により、車両の消費電力量(車両原単位)を低減する。また、誘導電動機の損失が大きいに着目し、誘導電動機の構造最適化とPWM制御方式の最適化により、消費電力量の削減を実現する(図4参照)。

3.2 誘導電動機の損失低減

一般に、誘導電動機の損失は、銅損、鉄損、機械損および高調波損失を含む漂遊負荷損に分類できる。銅損、鉄損は、基本波成分(正弦波成分)に起因して発生する。機械損は、誘導電動機の回転時に機械的要因によって発生する。高調波損失は、誘導電動機の構造によって発生する損失と、インバータ駆動時のPWM電圧波形の歪(ひずみ)によって発生する損失がある。

以前の誘導電動機は、外部から冷却風を取り入れる開放

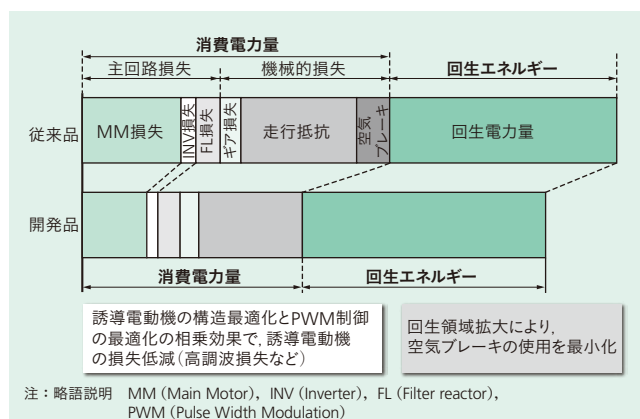


図4 | 消費電力量(車両原単位)の低減方針

高調波損失を低減した誘導電動機、PWM制御方式、回生領域拡大により、高効率駆動システムを実現する。

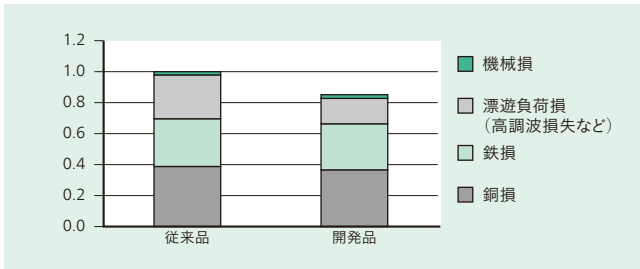


図5 | 従来全閉誘導電動機と開発した全閉誘導電動機の損失比較
従来機と比較して、高調波損失を約50%低減した。

型であったが、全閉型にすることで内部への塵埃(じんあい)の侵入をなくし、省メンテナンス化した。また、固定子・回転子構造の最適化により、銅損を低減してきた。

また、二次元電磁場解析を用いて、固定子ティース磁束密度、ギャップ幅および回転子スリットの高さを最適化することにより、高調波損失の低減を検討し、従来の全閉型の誘導電動機と比較して高調波損失を約50%に低減した⁹⁾(図5参照)。

次に、高調波損失を、PWMの最適化によって低減する。PWM制御のインバータ出力の基本波周波数とPWMキャリア周波数および出力電圧の関係を図6(a),(b)に示す。速度に応じて、新たに開発した3種類のPWM制御方式を切り替えて使用する。

従来、非同期PWMと同期PWMを組み合わせていた低速域では、線間電圧制御型のPWM方式とキャリア周波

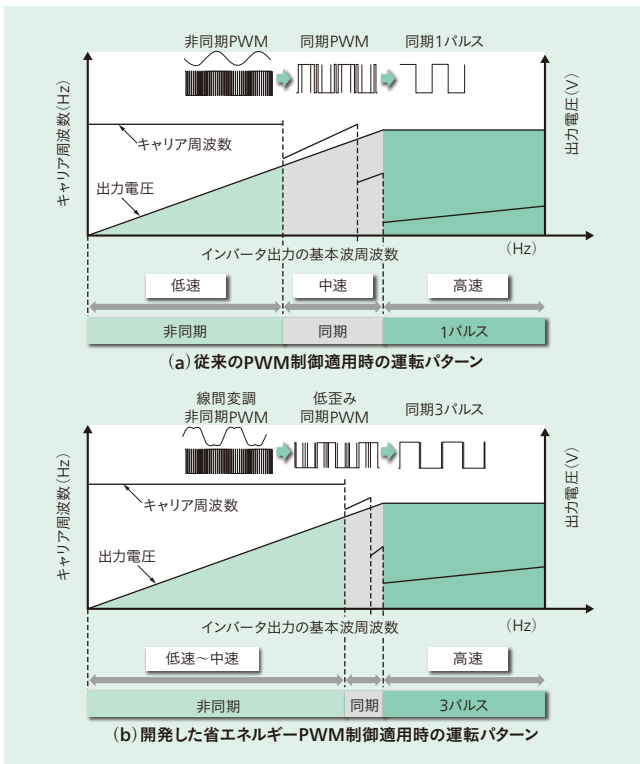


図6 | 従来PWM制御と提案する省エネルギーPWM制御方式
速度に応じて3種類のPWM制御方式を切り替えて使用し、高調波損失を低減する。

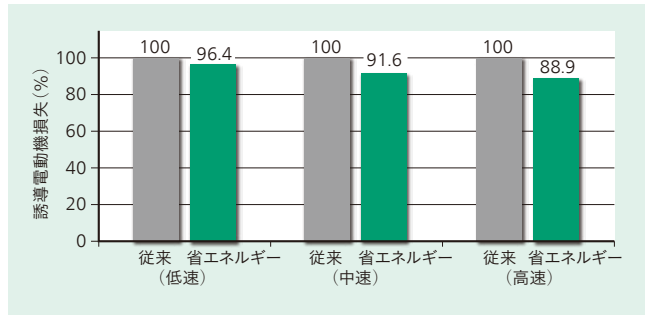


図7 | 実機試験による誘導電動機の損失低減効果
開発したPWM制御は、低速、中速、高速で高調波損失を低減した。

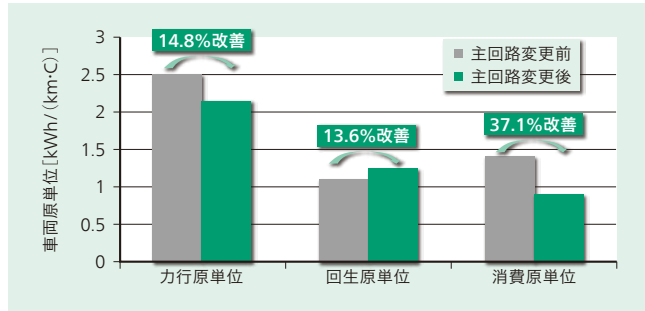


図8 | 近郊および通勤路線による省エネルギー効果の検証
従来システムと比較し、約40%の車両原単位低減を確認した。

数の最適化により、低次高調波を抑制しながら、非同期PWMの制御領域を拡大し、誘導電動機の高調波損失を低減する。また、中速域の後半の低歪み同期PWM制御により、5次、7次の低次高調波を抑制することにより、電流高調波を低減する。さらに高速域では、従来の同期1パルス駆動方式を低次高調波低減型同期3パルス駆動方式とすることで、同期1パルスと同等の電圧利用率を確保しながら、誘導電動機の高調波損失を低減する。

実機試験において、線間変調非同期PWM方式を採用した場合の誘導電動機の損失低減効果は3.6%、中速域で低歪み同期PWM制御を採用した場合の誘導電動機の損失低減効果は8.4%、高速域で最適同期3パルス駆動を採用した場合の誘導電動機の損失低減効果は11.1%となることを確認した¹⁰⁾(図7参照)。

3.3 省エネルギー機器適用による損失低減効果

SiCモジュール、高調波損失を低減した誘導電動機、PWM制御方式を適用し、誘導電動機の回生領域を拡大したときの車両原単位の低減効果を確認した。近郊および通勤路線における現車試験により、従来システムと比較して車両原単位37.1%低減を実証した¹¹⁾(図8参照)。

4. 走行方法の改善

運行計画で定められた到着時刻を守りながら駅間を走行する中でも、加速、定速、惰行、ブレーキの組み合わせ方(走行パターン)によって消費エネルギーが異なる(図9参

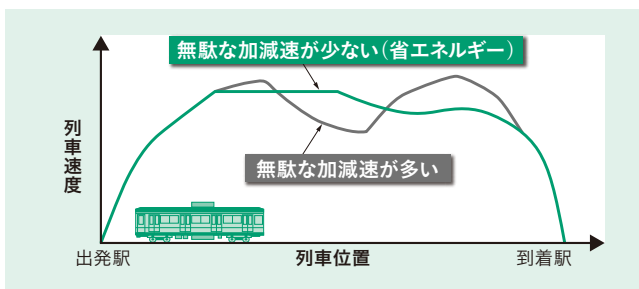


図9 | 省エネルギーな走行パターン

到着時刻を守りながら駅間を走行する中でも、加速、低速、惰行、ブレーキの組み合わせ方によっては、消費エネルギーが少なく済む。

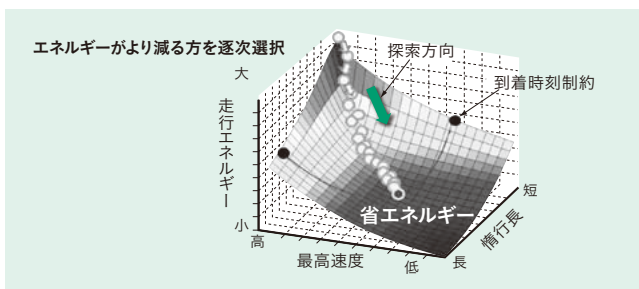


図10 | 開発した省エネルギー走行パターン探索アルゴリズム

最高速度の低減と惰行の増加を繰り返すことで、到着時刻の制約を満足しながら、消費エネルギーのより小さい走行パターンを求める。

照)。省エネルギーな運転制御を実現するため、消費エネルギーの小さい走行パターンを求めるアルゴリズムを開発した^{12), 13)}。

一般に、加速、定速、惰行、ブレーキの順に運転する区間において、最高速度の低減や惰行の増加によって区間の走行に掛かる時間が延びるほど、消費エネルギーは小さく済む。開発したアルゴリズムは、この性質を利用し、区間を最速で走る走行パターンを起点に、最高速度の低減と惰行の増加を少しずつ繰り返すことで、到着時刻を守りながら消費エネルギーのより小さい走行パターンを求めるものである(図10参照)。また、開発したアルゴリズムは、この探索の過程において下り勾配の箇所位置エネルギーを利用した加速をするように走行パターンを更新する処理を含む。このような特徴から、開発したアルゴリズムで求めた走行パターンを用いることで、路線ごとの地形に応じた省エネルギーな運転制御が可能になる。

5. おわりに

日立は、SiCなどの最先端のパワーデバイスや高効率な誘導電動機など、個々の進化した技術の採用と、高精度・高機能なシミュレーションを駆使した解析方法を開発し、それらの進化した新技術を連携させることで、省エネルギーで小型な主回路システム・駆動システムを実現する。

鉄道会社の省エネルギーのニーズに応えるとともに、さらなるグローバル展開を進めていき、環境性・快適性・安全性に優れた鉄道システムを提供していく。

参考文献など

- 1) 公益財団法人交通エコロジー・モビリティ財団：運輸・交通と環境2007年版(2007)
- 2) 豊田，外：IGBT応用3レベルインバータの開発，鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集，30th，p.355～359，日本鉄道サイバネティクス協議会(1993.11)
- 3) IGBT，株式会社日立パワーデバイス，<http://www.hitachi-power-semiconductor-device.co.jp/product/igbt/index.html>
- 4) 日立ニュースリリース，3kV級SiCダイオードを搭載したパワーモジュールを開発，(2009.4)，<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2009/04/0421b.pdf>
- 5) 石川，外：SiCダイオードを搭載した鉄道インバータ，鉄道サイバネティクスシンポジウム論文集，46th，論文番号506，日本鉄道サイバネティクス協議会(2009.11)
- 6) 石川，外：3kV級SiCショットキーバリアダイオードを搭載したハイブリッドモジュールと高速駆動を併用した鉄道インバータ，電気学会論文誌D(産業応用部門誌)，Vol.135，No.5，p.531～538(2015.5)
- 7) K. Ishikawa et al.: Traction inverter that applies compact 3.3 kV / 1200 A SiC hybrid module, 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE-ASIA), pp. 2140-2144 (2014)
- 8) 日経エレクトロニクス：3.3kVのSiCダイオードで鉄道用インバータを小型・軽量に，NE Selection パワー半導体第5回，2013.7.22号，p.70～74(2013.7)
- 9) 杉本，外：ロバスト感度解析を用いた誘導電動機の時間・空間高調波損失低減に関する検討，電気学会論文誌D(産業応用部門誌)，Vol.135，No.10，p.993～998(2015.10)
- 10) 坂井，外：PWM制御におけるモータ損失低減技術，鉄道サイバネティクスシンポジウム論文集，50th，論文番号502，日本鉄道サイバネティクス協議会(2013.11)
- 11) 岡原，外：京王電鉄株式会社8000系更新電車用主回路システム：SiCハイブリッドモジュール応用2レベルスナバレスVVVFインバータ制御装置，鉄道サイバネティクスシンポジウム論文集，52nd，論文番号505，日本鉄道サイバネティクス協議会(2015.11)
- 12) 村田，外：駅間の速度制限を考慮したエネルギー運転曲線作成方法，第2回鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail'95)，p.479～482(1995)
- 13) 西野，外：下り勾配を活用した省エネルギー運転曲線の作成方法，電気学会全国大会(2016.3)

執筆者紹介



石川 勝美

日立製作所 鉄道ビジネスユニット 水戸交通システム本部
プロセス設計部 所属
現在，鉄道車両用電力変換装置の開発の取りまとめ業務に従事
博士(工学)
電気学会上級会員



寺澤 清

日立製作所 鉄道ビジネスユニット 水戸交通システム本部
車両電気システム設計部 所属
現在，鉄道車両用電力変換装置の開発・設計の取りまとめ業務に従事
電気学会会員



坂井 俊文

日立製作所 鉄道ビジネスユニット 水戸交通システム本部
プロセス設計部 所属
現在，鉄道車両用電力変換装置の制御開発に従事
電気学会会員



杉本 慎治

日立製作所 研究開発グループ 制御イノベーションセンター
モータシステム研究部 所属
現在，鉄道車両用主電動機の研究開発に従事
電気学会会員



西野 尊善

日立製作所 研究開発グループ 機械イノベーションセンター
輸送システム研究部 所属
現在，安全・省エネルギーな鉄道システムの研究開発に従事
情報処理学会会員