

# 省エネと環境性能に寄与する 鉄道車両用PMSMドライブシステム

PMSM Drive System for Rolling Stock Contributing to Improvement of Energy-Saving and Environmental Performance

田坂 洋祐      川合 弘敏      谷口 峻

■TASAKA Yosuke      ■KAWAI Hirotooshi      ■TANIGUCHI Shun

省エネや環境性能に優れた鉄道車両用ドライブシステムを目指して永久磁石同期電動機 (PMSM) ドライブシステムを開発してきたが、更なる環境性能の向上に向けて技術開発を進めている。

インバータ装置では、信頼性向上とともに小型・軽量化を図った4in1インバータ装置を開発し、従来の誘導電動機 (IM) ドライブシステムと同等の寸法及び質量を実現した。また、いっそうの省エネに向けて、低損失SiC (炭化ケイ素) デバイスを応用したインバータ装置や高効率制御法を開発し、その実証試験を行った結果、消費電力量の低減を確認した。

Toshiba has been developing permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive systems aimed at realizing rolling stock drive systems with higher energy-saving and environmental performance.

In the field of inverters, we have developed a 4-in-1 traction inverter for PMSMs with higher reliability, as well as smaller size and lighter weight comparable to those of conventional drive systems for induction motors. To enhance energy conservation, we have now developed an advanced inverter incorporating both a low-loss silicon carbide (SiC) device and a highly efficient control method. We have conducted verification tests and confirmed that the newly developed inverter achieves reductions in power consumption and losses compared with conventional inverters using Si devices.

## 1 まえがき

現在、地球温暖化や大気汚染などの環境問題が顕在化するなか、環境性能や省エネに優れた鉄道システムでも、更なる改善が強く求められている。

当社は、2000年代以降、鉄道システムで主流である誘導電動機 (IM: Induction Motor) ドライブシステムに対して、特に省エネ化が図れる永久磁石同期電動機 (PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor) ドライブシステムを他社に先駆けて開発した。その優れた環境性能に多くの鉄道会社の賛同を得て、数々の実証試験や営業線への導入を積み重ねてきた。将来を見据えて地球環境のいっそうの維持と向上を目指し、環境性能のより優れた機器の開発を進めている。

ここでは、PMSMドライブシステムに関する最新の技術として、4in1インバータ装置による小型・軽量化をはじめ、新たな制御技術の開発による環境性能の向上と、低損失デバイスとして期待されるSiC (炭化ケイ素) を適用したインバータ装置の開発による省エネ化について述べるとともに、省エネ化の実証結果について述べる。

## 2 PMSMドライブシステムの環境性能向上

### 2.1 小型・軽量化技術

回転子に永久磁石を用いたPMSMは同期電動機の一つで、PMSMドライブシステムは、PMSMとそのドライブ用インバー

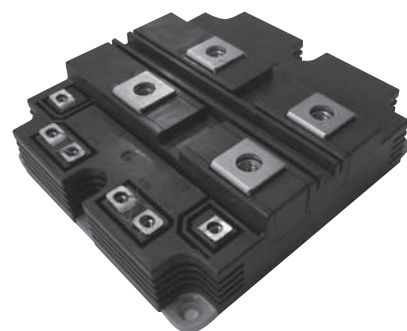


図1. パワーデバイス — 4in1インバータ装置では、3,300 V-500 A-2in1モジュールを適用している。

Power module for 4-in-1 traction inverter

タ回路を1対1に構成する個別制御方式を採っている。一方、IMの場合、複数の車両ドライブ用電動機 (以下、主電動機と呼ぶ) を1台のインバータ回路で一括制御ができる。鉄道車両の場合、インバータ装置のぎ装スペースが制約されるため、PMSMを適用するにあたっていかに個別制御方式でインバータ装置を小型化できるかが課題であった。

そこで、最大動作温度を従来の125℃から150℃に向上させてパッケージをコンパクト化した、損失が小さい2in1パワーデバイスを開発した (図1)。更にこのデバイスを生かせるように、1車両に計四つある主電動機を駆動する四つの個別インバータを一括冷却する冷却器を開発した。

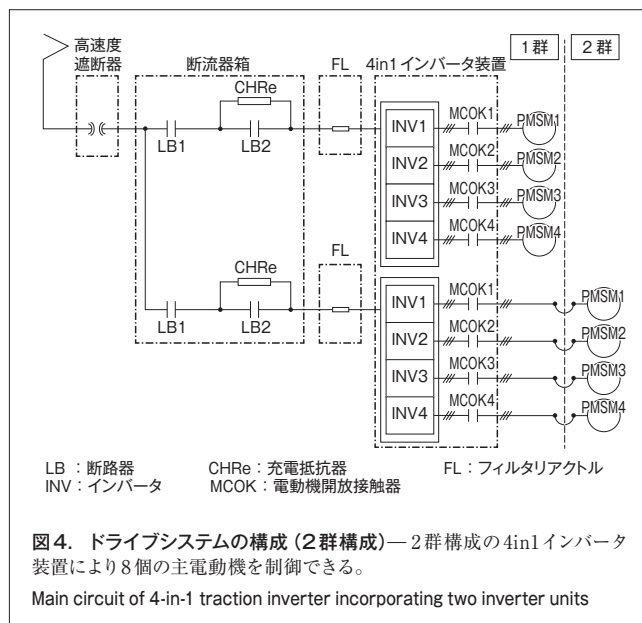
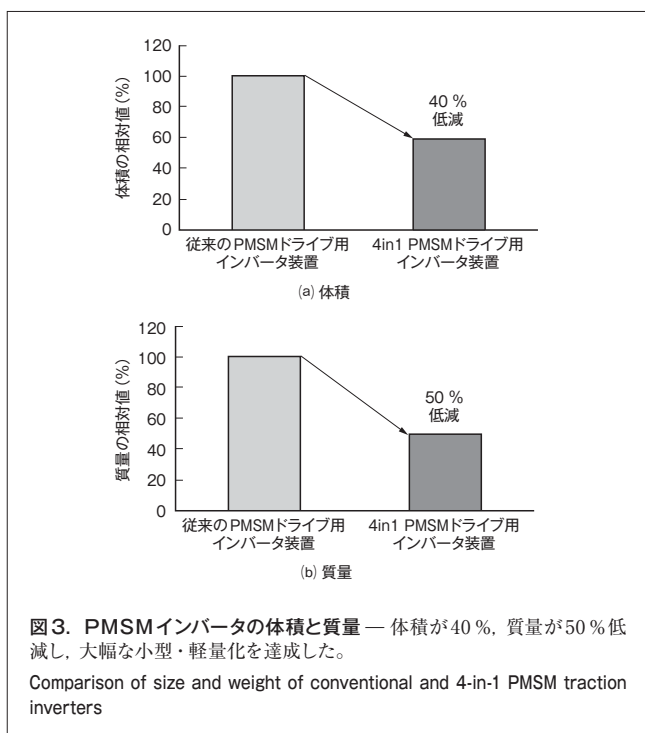
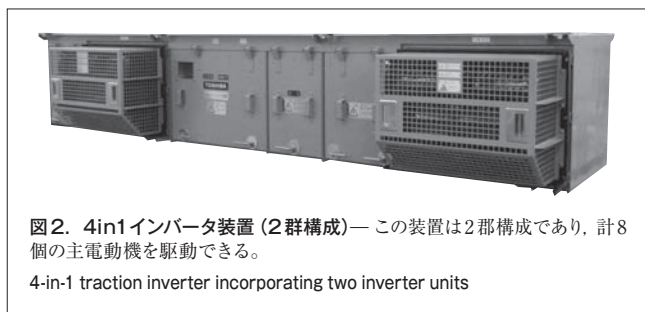
また制御面では、独自に開発した高速演算プロセッサを採

用し、二つの個別インバータを1プロセッサで駆動する方式を開発することで、制御ユニットを小型化した。

更に、主電動機開放用の3相接触器の各主接点を個別に駆動できる機構とし、1主接点が固渋した場合でも残りの2主接点を開放することで、PMSMの誘起電圧により発生する電流がフィルタコンデンサに流れることを防止し、信頼性を向上させた。

これらの施策により完成した4in1インバータユニットを2群搭載した装置の外観を図2に示す。PMSMドライブ用インバータ装置は、従来の当社製PMSMドライブ用インバータ装置に比べ体積が40%、質量が50%低減し、大幅な小型・軽量化を実現した(図3)。

4in1インバータ装置を適用したドライブシステムの構成を図4に示す。二つの4in1インバータユニットを一体箱に収めた2群4in1ドライブシステムの例であり、1システムでPMSM 8台を駆動できる。この構成では、制御装置を1両にだけ配置すればよく、鉄道車両の電動車(M)と付随車(T)の構成比を示すMT比が1対1の場合や電動車2両分を1装置で構成



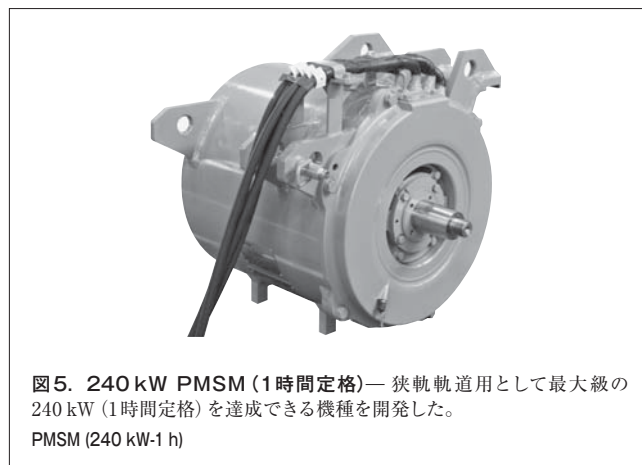
する車両に対して、ぎ装上有利である。

一方、主電動機であるPMSM自体についても、よりいっそうの低損失化を進めたことにより、台車への据付けスペースの制約が厳しい狭軌軌道用で、全閉自冷式のIMでは実現しえない全閉自冷式の240 kW(1時間定格)を開発し提供を進めている(図5)。

## 2.2 制御技術

PMSMドライブシステムの制御技術に関して、システム信頼性の向上や省エネを含めた環境性能の改善に向けた開発を進めている。

**2.2.1 電圧センサレス化** 鉄道車両の電動機ドライブ用インバータ装置は、損失を抑制して装置冷却が容易となるように惰行運転中にインバータ装置を停止する。一方、PMSMは回転子に磁石を持っており、回転中は逆起電圧が発生するため、惰行状態から、過電流や過電圧が生じないように、逆起電圧を抑制しながらインバータ装置を再起動する必要がある。

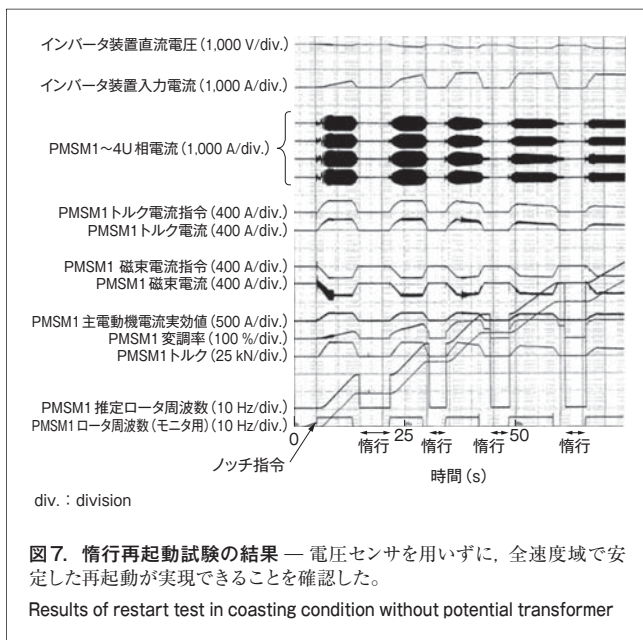
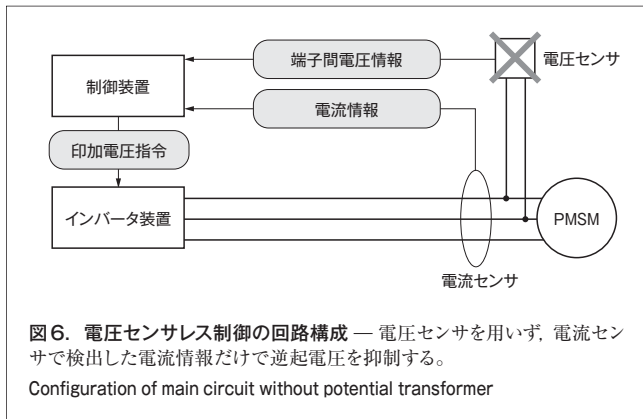


従来のPMSMドライブシステムでは、惰行中に主電動機の端子間電圧を検出する電圧センサを取り付けていたが、センサやインタフェース回路の信頼性と、部品や配線ぎ装のコストの観点から、電圧センサを用いずに、安定にインバータ装置を再起動する電圧センサレス制御を開発した(図6)。

電圧センサレス制御では、主電動機の電流情報だけを利用し、従来システムと比べて付帯部品は不要である。惰行状態からインバータ装置を再起動する際には、主電動機端子間電圧を常に最大にし、過大な主電動機電流を抑制するように制御することで、全速度域で安定した再起動を実現した(図7)。

**2.2.2 低騒音化** PMSMドライブシステムでは、トルクを精度よく制御するため、磁石磁束の方向を正しく推定する必要がある。低速域では、数100 Hzの高周波電流を重畳して磁石磁束の方向を推定するため、高周波電流に起因した耳障りな電磁騒音が発生する。

そこで、電磁騒音を抑制する技術として、変移確率に基づく周波数分散手法であるVPC (Variable Probability Control) 分



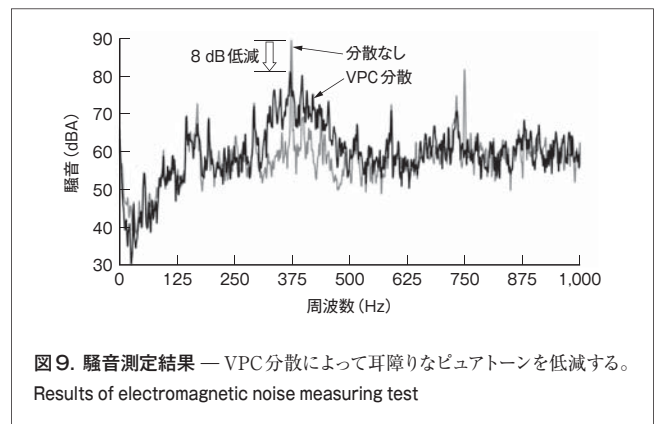
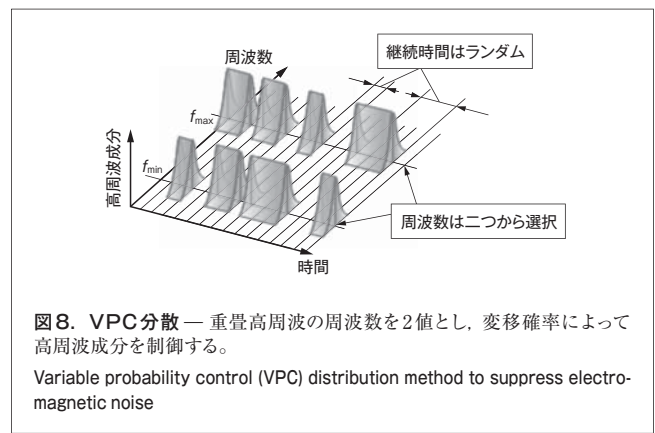
散を開発した。VPC分散は、重畳する高周波電流の周波数を分散することで、特定の周波数成分を出さないようにしてピュアトーンを低減する手法であるが、特に、重畳周波数を2値とし、その2値の周波数を選択する変移確率を操作することによって、発生する高周波電流成分を制御する方式である(図8)。

適用事例として、4in1インバータ装置で取得した騒音データを図9に示す。VPC分散によって重畳高周波(375 Hz)の騒音レベルが8 dB低減でき、耳障りな騒音が大幅に抑制されることを確認した。

**2.2.3 最高効率制御** 主電動機の損失は、巻線に電流を流すことで生じる銅損と、磁束により生じる鉄損とに分けられ、鉄損はおおむね速度(回転数)の二乗に比例する。従来の制御では、主電動機電流値を最小化する電流最小(銅損最小)制御を適用していたが、更なる高効率化を実施するために、銅損と鉄損の総和が最小となる最高効率制御を開発した。

最高効率制御では、速度の上昇に応じて磁石磁束を打ち消すように電流を流すことで鉄損を抑制し、銅損と鉄損を合わせたトータル損失が最小化するように制御する。

最高効率制御を適用することで、図10に示すように電流値は増加するものの、主電動機効率を改善することができる。速度に応じて鉄損が増加し、銅損と鉄損の割合が変化するため、速度に応じて効率が最大となるように電流位相角を制御する。



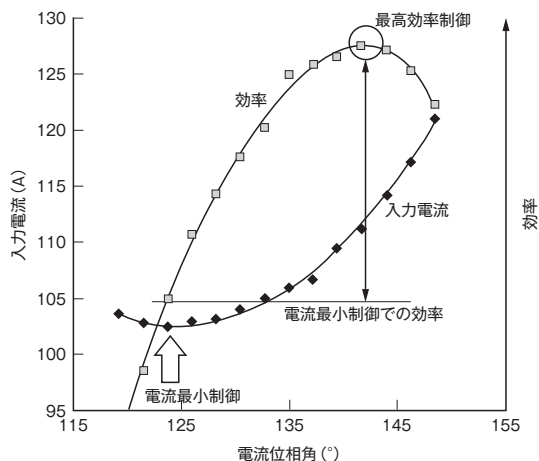


図10. 制御による効率と入力電流の変化 — 最高効率制御を適用すると、入力電流は上昇するが、効率を向上できる。  
Relationship between efficiency and input current based on control to minimize iron and copper losses of motor

従来の電流最小制御に比べて電流値が増加して、インバータ装置単体の損失は若干増加するため、低損失なSiCデバイスを採用することにより、最高効率制御の効果を相乗的に生かすことができる。

### 3 PMSMドライブシステムの省エネ化

#### 3.1 PMSMドライブシステムの省エネ性

PMSMドライブシステムは、従来のIMドライブシステムに比べて高効率であり、環境面で優れる鉄道システムでも、更なる省エネ化を進められるキー技術である。その省エネ効果について、フィールドでの実証結果の一例として、京王電鉄(株)8000系車両で、2013年2月から4月にかけて現車試験により消費電力量を測定した結果を述べる。

比較対象は同一編成内のIMドライブシステムであり、自己通風冷却形IM、及びGTO (Gate Turn-Off) 素子のインバータ装置から構成されるものである。また回生性能については、図11に示すように既存車性能が55 km/h以上で特性領域としているのに対し、PMSMに更新後の性能では定出力領域を設けることで、回生能力を向上させている。省エネの評価指標として、車両質量や運用による差異を考慮できるように、原単位 (kWh/(Car・km)) を算出した。

原単位の算出条件を表1に示し、それより算出した原単位を表2に示す。IMドライブシステムと比較して、力行では約13.2%、回生では約44.9%の原単位の改善、すなわち消費電力量の削減が確認できた。総合的にも約47.3%の消費電力量削減となり、省エネ化に大きく寄与するドライブシステムであることが実証できた。

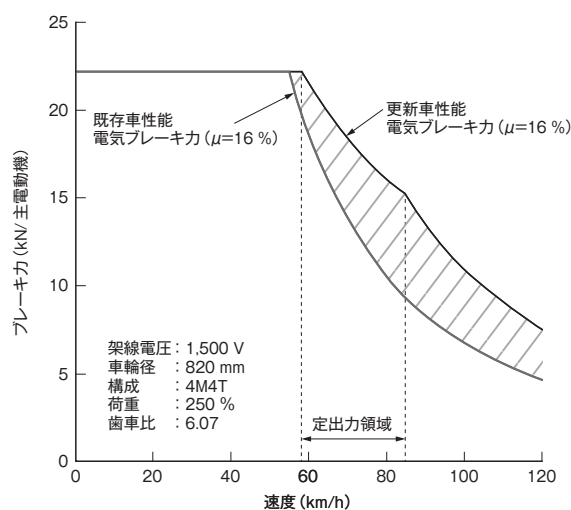


図11. 回生性能の向上 — 定出力領域を設けることで、回生能力を向上させる。  
Improvement of regenerative brake performance

表1. 原単位の算出条件

Conditions for calculation of unit power consumption rate

項目	編成質量 (t)	編成質量比*	走行距離 (km)	車両数 (両)
IMドライブシステム	130	1.00	約43,000	4
PMSMドライブシステム	127	0.97	約8,000	4

\*編成質量比はIMドライブシステムの編成質量を1とする

表2. 原単位の算出結果

Results of calculation of unit power consumption rate

項目	力行原単位 (kWh/(Car・km))	回生原単位 (kWh/(Car・km))	合計原単位 (kWh/(Car・km))
IMドライブシステム	2.41	0.89	1.52
PMSMドライブシステム	2.09	1.29	0.80

#### 3.2 更なる省エネ化を実現するSiCインバータ装置

更なるインバータ装置の高効率化を図るために、従来のSi (シリコン) を用いたIGBT (絶縁ゲートバイポーラトランジスタ) からSiCを用いた低損失ハイブリッドIGBTに置き換えたSiCインバータユニットを開発した。

試験車両に搭載されたPMSMドライブ用インバータ装置に、SiCインバータユニットを適用し、SiデバイスによるPMSMドライブ用インバータ装置と消費電力量の比較を行った。ここで、車両の荷重状態や停止から最高速度までの加速性能が、両者に差異がないことを確認している。

消費電力量に関する試験結果を表3に示す。2時間程度走行する間の消費電力量を計測した結果、ハイブリッドSiCデバイスによる低損失化と、同時適用した最高効率制御の効果に

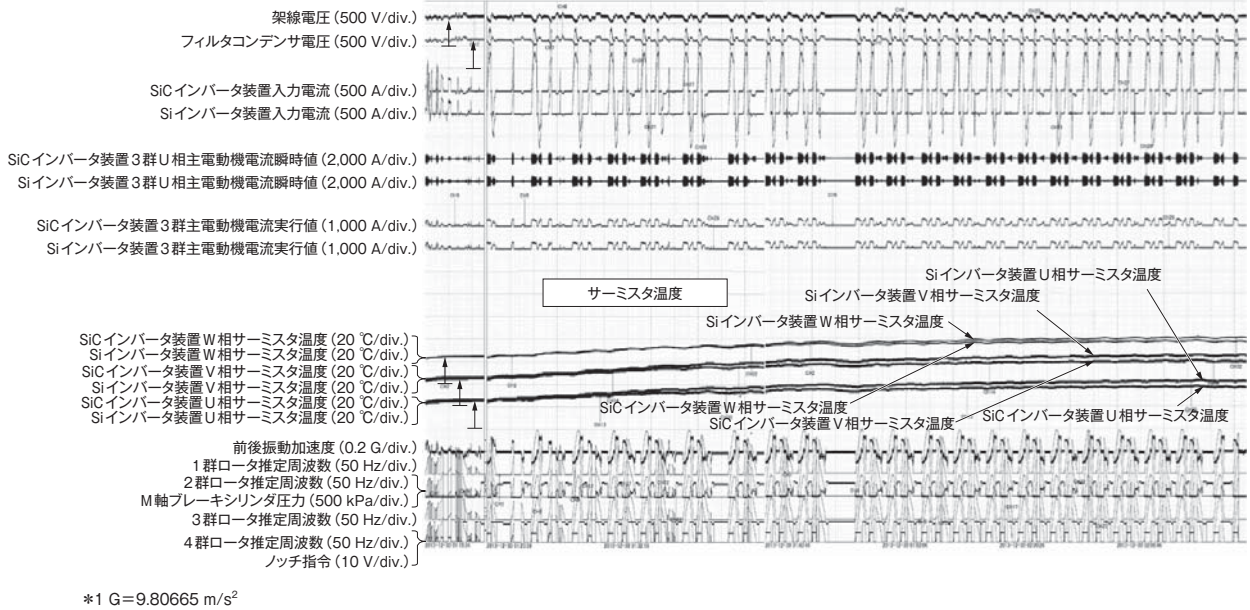


図12. サーミスタ温度の測定結果 — SiCインバータ装置のサーミスタ温度は、Siインバータ装置に比べて3～5℃低い。  
Results of thermistor temperature measurements

表3. 消費電力量の削減効果

Reduction of power consumption using SiC inverter unit

項目	力行運転時の消費電力量	
	(kWh)	比率 (%)
Siインバータ装置	183.644	100
SiCインバータ装置*	179.115	97.5

\* 2.2.3項に記載の最高効率制御を同時適用

より、従来のSiデバイスを利用したPMSMドライブシステムに比べて、約2.5%の消費電力量の低減効果が確認できた。

また、図12に示すようにSiCインバータ装置のサーミスタ温度は、Siインバータ装置のサーミスタ温度に比べ3～5℃温度が低くなっており、SiCデバイスの適用によりインバータ装置の損失が低減していることが確認できた。

## 4 あとがき

最新のPMSMドライブシステムについて述べた。営業線でPMSMドライブシステムが運用されてから5年以上が経過し、その有用性について広く認知されてきた。現在、SiCデバイスの登場により、環境性能のよりいっそうの向上を迎える状況にある。

今後も、地球規模での環境保全に向けて、優れた鉄道車両用ドライブシステムの開発とその適用促進に取り組んでいく。



田坂 洋祐 TASAKA Yosuke

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主務。鉄道車両電機品のエンジニアリング業務に従事。

Railway & Automotive Systems Div.



川合 弘敏 KAWAI Hiroto

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。鉄道車両用ドライブ装置の開発に従事。電気学会会員。

Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems



谷口 峻 TANIGUCHI Shun

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 電機電池応用・パワエレシステム開発部。モータドライブシステムの研究・開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center