

SiCパワーモジュールを適用した 鉄道車両用インバータ装置

菅原徹大*
Tetsuo Sugahara
石田貴仁*
Takahito Ishida
山下良範*
Yoshinori Yamashita

Traction Inverter System with SiC Power Module for Railway Vehicle

要 旨 (1)(2)(3)

2015年に国連総会でSDGs(持続可能な開発目標)が採択された。三菱電機は、これを社会から求められる重要な課題ととらえており、2018年度には、更にSDGsに貢献するため“三つの重点的に取り組むSDGs”を定めた。

- (1) 目標9：産業と技術革新の基盤をつくろう
- (2) 目標11：住み続けられる街づくりを
- (3) 目標13：気候変動に具体的な対策を

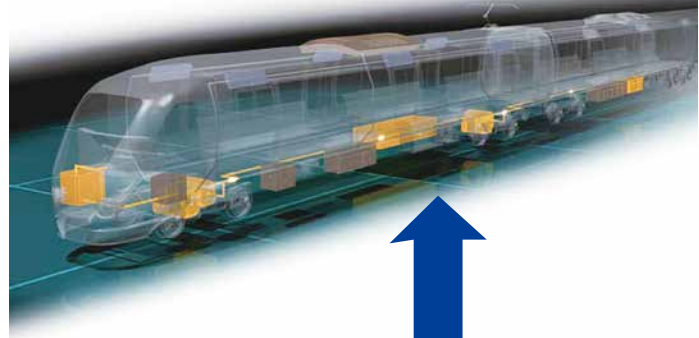
これらの目標に関連する技術として鉄道車両用電機品の省エネルギー化技術が挙げられる。当社は2012年2月からハイブリッドSiC(シリコンカーバイド)パワーモジュールを適用した鉄道車両用インバータ装置を世界に先駆けて(注1)東京地下鉄(株)01系営業線での性能評価試験を実施した。SiCパワーモジュールの適用によって、電力回生ブレーキ領

域の拡大、高周波スイッチングによるモータ損失の低減等、主回路システム全体として38.6%の省エネルギー化に寄与した。2016年2月には世界初(注2)のフルSiCパワーモジュールを適用したインバータ装置で40%の省エネルギー化に貢献し、“優秀省エネルギー機器表彰 経済産業大臣賞”を受賞した。今後継続的に、SDGsの省エネルギー目標に対して貢献するため、顧客ごとの様々な主回路システムに柔軟に対応し、より小型軽量化することで、国内・海外問わず、幅広い市場にSiCパワーモジュールを適用したインバータ装置の展開を見据え、並列駆動に適したLV100タイプと呼ばれる最新のフルSiCパワーモジュールを適用したインバータ装置を開発した。

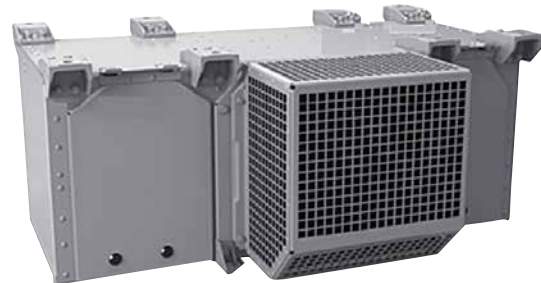
(注1) 2012年9月27日現在、当社調べ
(注2) 2014年4月30日現在、当社調べ



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装置を製品化し、2014年度末から市場に投入した。従来車両と比較して約40%の省エネルギー効果を実現した。



LV100タイプ フルSiCパワーモジュール



LV100タイプ フルSiCパワーモジュール適用インバータ装置

SiCパワーモジュールを適用した鉄道車両用インバータ装置

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等、主回路システム全体としての省エネルギーに寄与できる。3.3kV フルSiCパワーモジュールを適用したインバータ装置では従来車両と比較して約40%の省エネルギーを実現した。

1. ま え が き ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

1997年の京都議定書が採択されて以降、様々な地球温暖化防止対策が進められてきた。その後、2018年に国連でSDGsが採択され、更に幅広い視野での社会課題解決が必要になっている。その中で当社は鉄道事業で培った技術で、持続可能で安全・安心・快適な、豊かな社会の実現に取り組んでいる。エネルギーの効率的な利用という面では、当社は2012年2月にハイブリッドSiCパワーモジュール(IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)をSi(シリコン)、ダイオードをSiCにしたパワーモジュール)を適用したインバータ装置を世界に先駆けて東京地下鉄(株)01系営業線での性能評価試験を実施したことを皮切りに、国内・海外向けインバータ装置にSiCの技術を多数適用している。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等、主回路システム全体としての省エネルギーに寄与している。2016年2月には世界初のフルSiCパワーモジュール(MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)・ダイオード共にSiCとしたパワーモジュール)適用した推進制御装置が“優秀省エネルギー機器表彰 経済産業大臣賞”を受賞した。

今後継続的に、SDGsの省エネルギー目標に対して貢献するため、顧客ごとの様々な主回路システムに柔軟に対応可能な最新のSiCパワーモジュールを適用して、より小型軽量化したインバータ装置を開発した。

近年、パワーモジュールは並列駆動に適したLV100タイプのパッケージが世界標準になっている。パワーモジュールを開発・製造するパワーモジュールメーカー各社はLV100タイプのSiパワーモジュールを製品展開しているが、当社は世界で初めて^(注3)LV100タイプのフルSiCパワーモジュールを製品化し、Siパワーモジュールに比べてスイッチング損失を約80%低減した。これによって主回路システム全体としての省エネルギーに寄与することはもとより、世界標準パッケージ適用によって、インバータ装置の小型軽量化を実現でき、多様な鉄道車両用インバータ装置の構成・容量に対して最適な設計ができるようになった。

本稿では、最新のSiCパワーモジュールを適用した鉄道車両用インバータ装置の特長、並びに実際の営業運用の中で得られた省エネルギー効果について述べる。

(注3) 2017年5月11日現在、当社調べ

2. LV100タイプ フルSiCパワーモジュール適用インバータ装置

2.1 インバータ装置

LV100タイプ フルSiCパワーモジュール適用インバータ装置の主要諸元を表1、外観を図1に示す。国内の在来線向けシステムを想定し、インバータ装置1台で最大220kWの誘導電動機を4台並列駆動する仕様になっている。

インバータ装置は断流器回路・パワーユニット・ゲート制御装置から構成されているが、LV100タイプのSiCパワーモジュールを適用することで、冷却器の小型化、フィルタコンデンサ・ラミネートブスバー等、SiCパワーモジュールとともに構成されるパワーユニットの高密度実装化を実現することで、従来のSiパワーモジュール適用インバータ装置に対して体積を約60%、質量を約50%低減できた。

2.2 LV100タイプ フルSiCパワーモジュールの特長⁽⁴⁾

図2にLV100タイプ フルSiCパワーモジュールの回路構成と外観を示す。LV100タイプのパワーモジュールは2レベルインバータの1アーム分の回路から構成されている。一般的なSiパワーモジュールの場合はSi-IGBT、フライホイールがSi-Di(シリコンダイオード)素子で構成されているが、フルSiCパワーモジュールの場合はSiC-MOSFETとSiC-SBDで構成している。

当社LV100タイプ パワーモジュールとしては、フルSiCパワーモジュールだけではなく、フルSiCパワーモジュールと互換性を持ったSiパワーモジュール、ハイブリッドSiCパワーモジュールも製品化しており、鉄道車両

表1. LV100タイプ フルSiCパワーモジュール適用インバータ装置の主要諸元

項目	仕様
入力(架線)電圧	DC1,500V
主回路方式	2レベル方式電圧型PWMインバータ
モータ駆動容量	最大定格220kW×4台
冷却方式	走行風自冷方式

PWM : Pulse Width Modulation

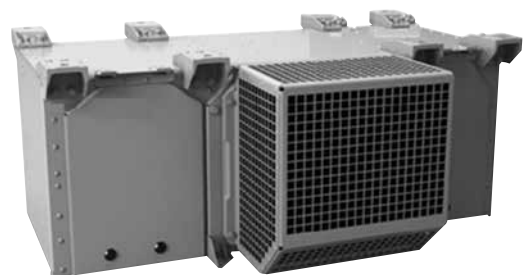


図1. LV100タイプ フルSiCパワーモジュール適用インバータ装置

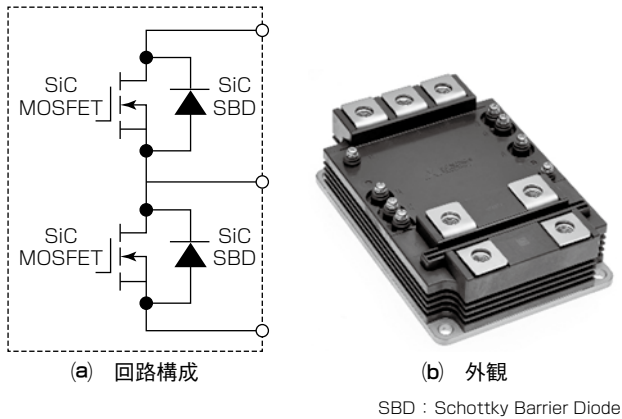


図2. LV100タイプ フルSiCパワーモジュール

表2. LV100タイプパワーモジュールの主要諸元

モジュール種類	Siパワーモジュール	フルSiCパワーモジュール
ドレイン・ソース間電圧	3,300V	3,300V
ドレイン電流	600A	750A
最大ジャンクション温度	150℃	175℃
スイッチング部	Si-IGBT	SiC-MOSFET
ダイオード部	Si-Di	SiC-SBD
外形寸法	100×140×40(mm)	100×140×40(mm)

の要求仕様に応じて、最適な素子を使用できる。

また、LV100タイプパワーモジュールは並列駆動を容易にする端子配列になっており、鉄道車両の要求仕様に応じて並列数を変えることで最適化を図ることができる特長を持っている。

表2にLV100タイプSiパワーモジュール、及びLV100タイプフルSiCパワーモジュールの主要諸元を示す。フルSiCパワーモジュールはSiパワーモジュールと比較し、電流量25%、ジャンクション温度許容値約16%増加、かつスイッチング損失80%低減を実現した。これによって、Siパワーモジュールよりも少ない素子並列数で同容量のモータを駆動でき、インバータ装置の小型軽量化に寄与している。

3. 小田急5000形への適用事例

当社は2014年に運用開始した小田急電鉄(株)(以下、“小田急”という。)1000形リニューアル車向けに世界初となる3.3kVフルSiCパワーモジュール適用インバータ装置を納入し、省エネルギー効果を実証した。2016年2月には小田急と共同で“優秀省エネルギー機器表彰 経済産業大臣賞”を受賞した。

その後、2019年には小田急5000形向けに、2章で述べたLV100タイプフルSiCパワーモジュールを適用したインバータ装置を納入した。この章では5000形向けLV100タイプフルSiCパワーモジュール適用インバータ装置の適用事例を中心に述べる。

3.1 搭載システムの諸元

表3に5000形車両と1000形リニューアル車両の諸元を示す。5000形車両は、1000形リニューアル車両と同様の10両編成(5M5T)を適用しており、8000形車両等の置き換えとして新造されている。図3に示すとおり、主回路システムは、VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータ装置1台で4台の主電動機を制御する。

図4にVVVFインバータ装置の外観を示す。5000形車両向けインバータ装置は、1000形リニューアル車向けインバータ装置と比較し、体積で約30%、質量で約20%の小型軽量化を実現した。

3.2 本線走行試験結果

小田急本線で5000形向けインバータ装置の性能確認試験を実施した。図5に力行試験走行チャート、図6に回生試験走行チャートを示す。性能確認試験の結果から、力行・ブレーキの加減速度等、各種車両レベルでの評価を実

表3. 小田急車両の諸元

項目	5000形	1000形リニューアル
電気方式	DC1,500V(架空電車線方式)	
編成(MT比)	10両編成(5M5T)	
軌間	1,067 mm	
最高速度	120 km/h	110km/h
加速度	3.3 km/h/s(250%乗車まで)	
減速度	4.0 km/h/s	
歯車比	6.31	
編成質量	308.7ton/編成	351.8ton/編成
主回路制御方式	SiC適用 電圧形VVVFインバータ	

5M5T : 5 Motor cars 5 Trailer cars

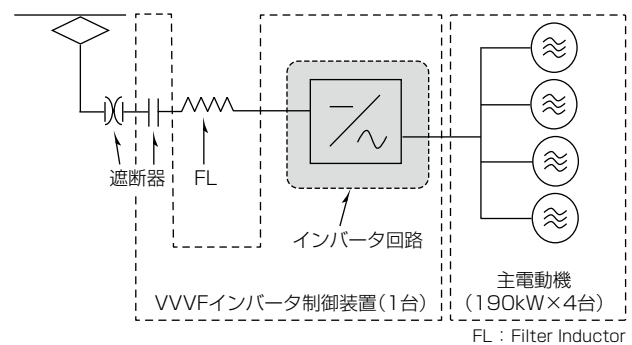
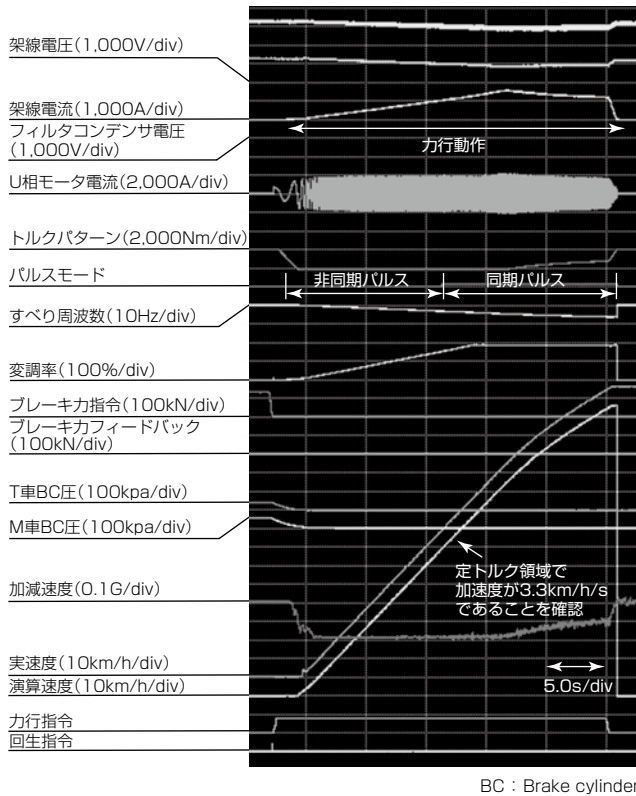


図3. 5000形主回路システムの構成



図4. 5000形車両のVVVFインバータ装置



BC : Brake cylinder

図5. 力行試験走行チャート

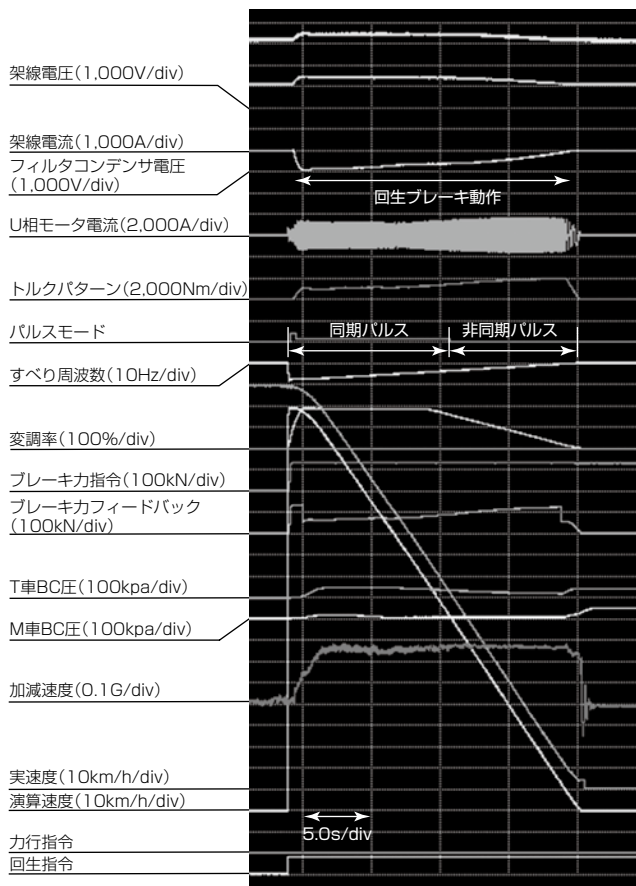


図6. 回生試験走行チャート

表4. 5000形, 及び1000形リニューアル車向け電力解析結果

5000形				
車号 5051編成(5M5T)				
	力行電力量 (kWh/(km・車))	回生電力量 (kWh/(km・車))	原単位 (kWh/(km・車))	原単位 (kWh/(km・ton))
編成 計	1.3330	0.5880	0.7450	0.0241
1000形リニューアル				
車号 1093編成(5M5T)				
	力行電力量 (kWh/(km・車))	回生電力量 (kWh/(km・車))	原単位 (kWh/(km・車))	原単位 (kWh/(km・ton))
編成 計	1.5500	0.7340	0.8160	0.0232

施し、LV100タイプフルSiCパワーモジュール適用インバータ装置の健全性を確認した。また、これまでのSiCパワーモジュール適用インバータ装置開発を通じて得られた知見として、低騒音に寄与できる変調方式を採用し、乗車時の快適性改善も図った。

表4に、5000形車両、及び1000形リニューアル車両の営業線運用での原単位を解析した結果を示す。走行条件は異なるが、5000形の原単位は0.0241kWh/(km・ton)、1000形リニューアルの原単位は0.0232kWh/(km・ton)とほぼ同等の値であった。このことから、5000形車両の主回路システムは、既存のGTO(Gate Turn-Off thyristor)車両に対し、約40%の省エネルギー化を達成した1000形リニューアル車両と同様の省エネルギーシステムであることが確認できた。

4. むすび

LV100タイプフルSiCパワーモジュールを適用した鉄道車両用インバータ装置の特長、及び小田急5000形での適用事例を述べた。

世界的にSDGsに対する貢献が求められる中、環境負荷が低く、省エネルギー化に寄与できる鉄道システムは非常に重要な役割を担っている。特に今後も発展が見込まれる半導体素子、パワーエレクトロニクス分野では更なる省エネルギーシステムの開発が進むと想定される。

当社はSiCパワーモジュールを鉄道向けに世界で初めて適用したメーカーとして、今後も省エネルギー機器の開発によって環境負荷低減に貢献するための製品化開発を進めていく。

参考文献

- (1) 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, 電気学会全国大会 No.5-078 (2012)
- (2) 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, 電気学会全国大会No.4-139 (2010)
- (3) 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)
- (4) 根岸 哲, ほか: 3.3kVフルSiCパワーモジュール, 三菱電機技報, 92, No.3, 175~178 (2018)