鉄道車両用パワーデバイスの動向

小林知宏*
梅嵜　勲**
中山　靖***

Trend of Power Device for Railway Vehicle

Tomohiro Kobayashi, Isao Umezaki, Yasushi Nakayama

要　旨

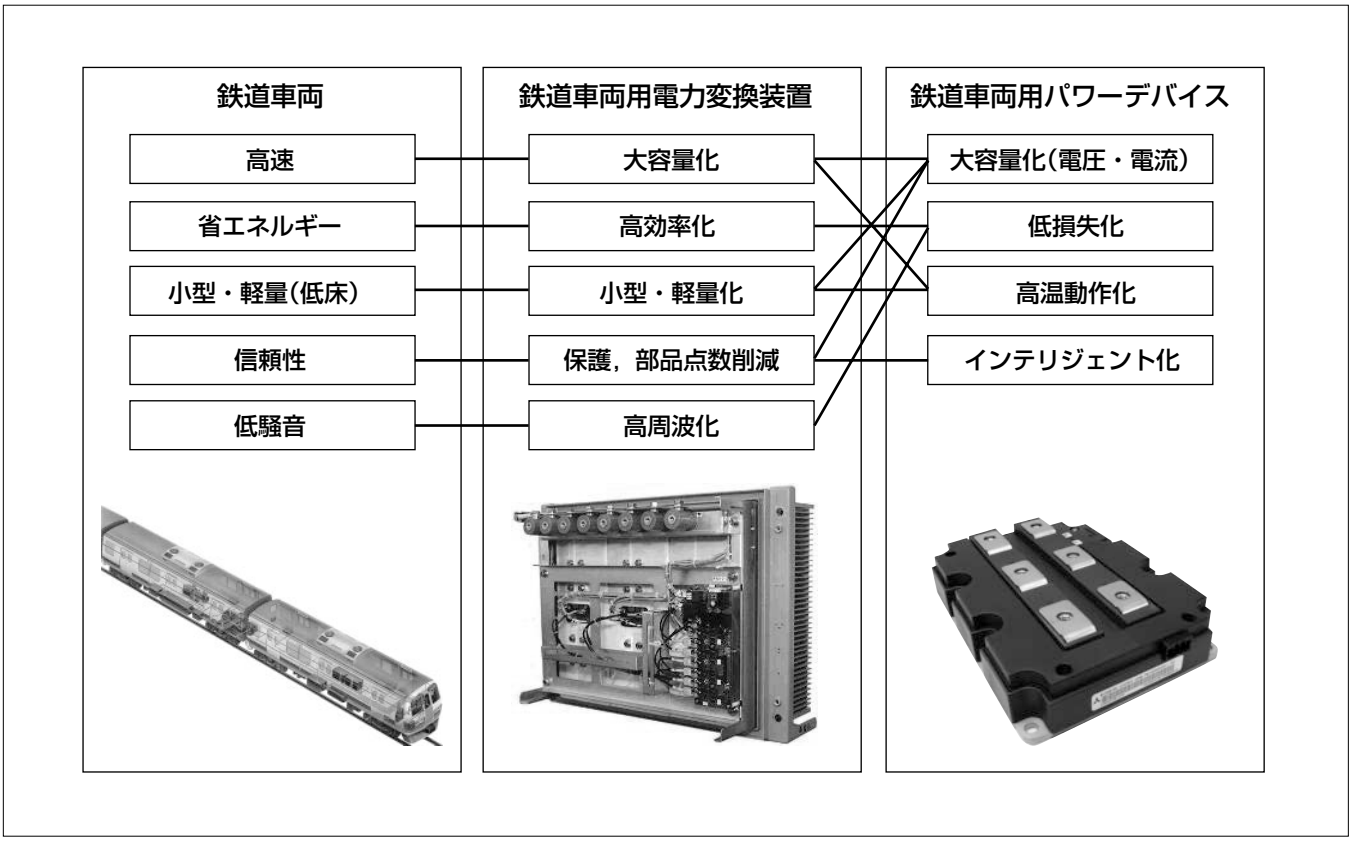
鉄道は，従来，公共性，安全性，信頼性，定時性，環境性に優れた輸送手段であることが評価されてきたが，ここ最近の環境に対する意識の高まりから，世界的に環境負荷の低い輸送手段として再認識される状況となっている。

鉄道の輸送手段としての範囲は，新幹線に代表される大都市間の高速旅客輸送，通勤電車等の都市から近郊までの旅客輸送，路面電車や新交通システム等の都市部の旅客輸送，さらに長距離貨物輸送と幅広く，そのニーズも多岐にわたっている。例えば，大都市間の旅客輸送，貨物輸送では高速化・大量輸送のため変換器の大容量化が求められるし，路面電車では小型・低床化によって利用しやすい乗り物であることが求められる。

鉄道に対する要求事項は，すなわち，鉄道車両，電力変換装置，パワーデバイスに対する要求事項にブレークダウンされる。

三菱電機では，鉄道車両用パワーデバイスに対する要求事項にこたえるため，これまでにもHVIPM(High Voltage Intelligent Power Module)によって高耐圧化，大電流化，低損失化，インテリジェント化を図ってきたが，このたび最近の大容量化の要求を従来と同等の装置実装で実現するために，大電流化，高温動作化を実現した“RシリーズHVIPM”を開発した。

本稿では，RシリーズHVIPMの特長と鉄道車両用電力変換器の応用について述べるとともに，今後のパワーデバイスの動向として，シリコンカーバイド(SiC)デバイスの開発の状況と，その鉄道車両への応用について述べる。



鉄道車両用パワーデバイスに対する要求事項

鉄道に対する要求事項を基に，鉄道車両，鉄道車両用電力変換装置，鉄道車両用パワーデバイスに対する要求事項のブレークダウンを示す。これまで鉄道車両用パワーデバイスは，高耐圧化，大電流化，低損失化，インテリジェント化によって，鉄道車両の高速，省エネルギー，小型・軽量，信頼性，低騒音を実現してきた。

*伊丹製作所　**パワーデバイス製作所　***先端技術総合研究所

1. まえがき

ここ最近の環境に対する意識の高まりから，鉄道が世界的に環境負荷の低い輸送手段として再認識され，鉄道車両用パワーデバイスもその要求に応じて進歩している。

鉄道用車両用パワーデバイスは，一般的に600～750V架線には1.7kV耐圧品，1,500V架線及び高速車両3レベル用には3.3kV耐圧品，3,000V架線用には6.5kV耐圧品が使用され，当社ではこのたび，3.3/6.5kV耐圧の新しくRシリーズHVIPMを開発した。

本稿では，このRシリーズHVIPMの特長とその鉄道車両用電力変換器の応用について述べるとともに，今後の鉄道車両用パワーデバイスとその応用について述べる。

2. RシリーズHVIPMの特長

2.1 RシリーズHVIPM開発の背景

当社はIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)に駆動回路，保護機能を内蔵し，さらに鉄道車両用電力変換装置に適用可能な大容量のHVIPMを他社に先駆けて開発し，1997年に新幹線の推進制御用として採用されて以来，多数の市場実績を誇っている。

今回，開発した3.3／6.5kV耐圧のRシリーズHVIPMは高速車両や3,000V架線用2レベル電力変換装置の大容量化を実現するために，従来のHVIPMに対して25%の定格電流アップを図っている。また，3.3kV耐圧品に関しては，最大動作温度を125℃から150℃に拡大し，高温動作を可能としている。

次に，3.3kV耐圧品をRシリーズの代表として，その特長などについて述べる。

図1．3.3kV耐圧RシリーズHVIPMの外観

表1．3.3kV耐圧Rシリーズ HVIPMの特長・特性

	従来HVIPM	Rシリーズ
定格電流	1,200A	1,500A
最大動作温度	125℃	150℃
過熱保護用温度センサ	チップ外別置き温度センサ	IGBTチップ内蔵型
VCE(sat)(注1)	3.80V	3.80V
VEC(注1)	3.15V	2.75V

(注1) 特性測定条件：通電電流Ic＝1,500A，接合温度Tj＝125℃
VCE ：Collector-Emitter Voltage
VCE(sat)：Collector-Emitter Saturation Voltage
VEC ：Emitter-Collector Voltage

2.2 RシリーズHVIPMの特長

3.3kV耐圧RシリーズHVIPMの外観を**図1**に示す。従来のHVIPMに対して基本外形や信号のインタフェースを変更せずに取り付け互換性を保ちながら，性能向上を図っている。

表1に，従来品のHVIPMとRシリーズHVIPMの特長と特性比較を示す。定格電流は従来の1,200Aから1,500Aにアップし，最大動作温度150℃を実現すると同時に，過熱保護検出を高精度な方式にしている。

2.3 開発における技術課題と対策

2.3.1 高温動作における課題と対策

高耐圧の半導体デバイスでは，電圧阻止状態のコレクタ遮断電流(通称：漏れ電流)が大きい場合は，発生する電力損失が接合温度を上昇させるため，更に漏れ電流が増加し正帰還がかかると，最終的に熱破壊に至る場合がある。このため，最大動作温度をさらに高くして使用する場合は，この漏れ電流を低く抑える必要がある。

そのため，RシリーズHVIPMに搭載される半導体チップは，従来の電気的特性を損なうことなく漏れ電流を抑えるために新たなチップ構造設計を行い，また，高温化における制御・保護機能の最適設計及び構造部材の選定と製造プロセス開発を行った。

2.3.2 定格電流アップの課題と対策

定格電流アップに伴い，**2.3.1項**の高温化と合わせて半導体チップが動作時に受ける負荷は従来のものよりはるかに過酷なものとなるため，遮断耐量(Reverse Bias Safe Operating Area：RBSOA)をはじめとする動作確認を－50～＋150℃の全動作温度範囲で実施した。さらに通電能力を上げるための最適な構造設計を行うことで，25%の定格電流アップが可能となった。

2.3.3 保護機能の性能アップ

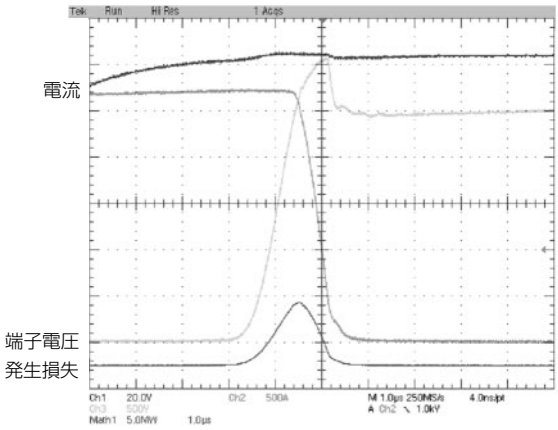
当社のHVIPMに備えられた制御電源低下保護(UV)，過電流保護(OC)，過熱保護(OT)を，精度良く，また個体差などのばらつきを小さくすることによって，電力変換装置の余分な設計マージンが不要となり，経済的で高性能な装置設計が可能になる。

特に，RシリーズHVIPMの過熱保護では，チップ自体に温度検出用のセンシング部を内蔵し，デジタル信号で特性調整可能なデジタルトリミングICとの組み合わせによって，より確実で迅速な過熱保護を実現している。

2.3.4 最大ターンオフ時の波形

RシリーズHVIPMの定格電圧1,500V，定格電流1,500Aに対して，最大定格2,500V／2,700Aにおけるターンオフ時の波形を**図2**に示す。

いずれの動作波形でも150℃の高温化で異常な挙動などはなく，安定した動作が確認できた。



（Vcc＝2,500V，Ic＝2,700A，Tj＝150℃）

図２．150℃におけるターンオフ波形

従来Siインバータ比
損失：70%低減，体積：75%低減

図３．11kW出力SiCインバータの試作品

3. RシリーズHVIPMの応用

鉄道車両用電力変換装置に用いられている主な冷却方式には，大容量の高速車両では強制風冷式沸騰冷却（フロリナート），中容量の近郊車両では自冷式ヒートパイプ（水冷媒），比較的小容量の都市型車両では自冷式ドライパネルなどがある。主に高速車両に用いられている3.3kV耐圧のRシリーズHVIPMは最大動作温度150℃を実現しており，これによって，高速車両用電力変換装置で，従来フロリナートの沸騰冷却を用いていたものを水冷媒の沸騰冷却へ置き換えることが可能となり，これまでよりも環境に配慮した冷却方式にできる。

大都市間の旅客輸送で環境負荷の低い鉄道が見直された結果，世界的に車両の高速化が進んでおり，電力変換装置の大容量化が求められている。このため，RシリーズHVIPMを高速鉄道車両用の電力変換装置に搭載して，その特長である大定格電流，最大動作温度150℃の検証を実施している。

4. 今後の鉄道車両用パワーデバイスの展望

4.1 シリコンからシリコンカーバイドへ

鉄道車両用パワーデバイスはこれまで飛躍的な発展を遂げてきたが，シリコン（Si）デバイスによる高性能化は，近年では飽和傾向にある。そのため，Siに比べて損失が低く，高温動作が可能なシリコンカーバイド（SiC）が次世代パワーデバイス材料として期待されている。

当社では，SiC-MOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor），SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）の開発を進めており，1.2kV耐圧のSiC-MOSFETとSiC-SBDを組み合わせたSiCインバータで2006年に世界で初めて3.7kW定格の三相モータの駆動に成功した[1]。現在では11kWのSiCインバータで，Siインバータと比較して損失で70%低減，体積で75%低減を達成している（**図３**）。また，高耐圧化開発も進めており，1.7kV耐圧素子で，低オン抵抗，スイッチング損失の低減を確認している[2]。

4.2 SiCデバイスの鉄道車両用電力変換器への応用

SiCデバイスを鉄道車両用電力変換装置に応用した場合，次のような効果が期待できる。

(1) 推進制御装置

低損失化によって大幅な省エネルギーが可能になるとともに，損失低減と高温動作化によって，冷却器が大幅に簡略化でき，さらに環境に配慮した電力変換装置にできる。

(2) 補助電源装置

低損失化によって変調周波数の高周波化が可能となるため，出力段にあるフィルタの小型化が可能となる。

以上のような効果が期待できるSiC鉄道用車両用パワーデバイスを実用化するには，1.7kV耐圧品，3.3kV耐圧品が必要で，定格電流は数百A以上のものが必要となるため，高耐圧化，大電流化が今後の開発課題となる。

5. む す び

鉄道車両用のパワーデバイスに対する要求事項について整理し，今回開発したRシリーズHVIPMの特長を中心に述べた。また，次世代のパワーデバイス材料として期待が高いSiCデバイスの開発状況と，鉄道車両応用の効果と開発課題について述べた。

参 考 文 献

(1) 木ノ内伸一，ほか：SiC-MOSFETインバータによる3.7kW定格モータ駆動，三菱電機技報，**80**，No.6，367～371（2006）
(2) 1.7kV耐圧SiCデバイス技術，三菱電機技報，**83**，No.1，5（2009）