"Rシリーズ" HVIPM

"R series" HVIPM

Hitoshi Uemura, Isao Umezaki, Kazuhiro Morishita, Ryosuke Nakagawa

要 旨

世界的な環境意識の高まりに対し、電気鉄道による旅 客・貨物輸送は環境負荷の低い輸送手段としてその重要性 が高まってきている。大型電力変換装置に使用されるパワ ー半導体デバイスの主流は、十数年前まで広く採用されて いたGTO(Gate Turn Off)サイリスタから、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールなどの新しいデ バイスへと大きく変遷している。

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,これまでにも高耐圧化,大電流化, 低損失化,高機能化としてHVIPM(High Voltage Intelligent Power Module)の開発を行ってきた。そしてこのた び,これらの要求事項及び高温動作化を実現した"Rシリ ーズ"HVIPMを開発した。 RシリーズHVIPMの主な特長を次に示す。

(1) 動作温度

新構造のIGBT・Diodeチップと,温度特性を改善したパ ッケージ材の採用によって,3.3kV耐圧RシリーズHVIPM の最大動作温度を150℃に拡大し,高温動作を可能とした。 (2) 定格電流

低損失IGBTとDiode及び低抵抗電極の採用によって, 定格電流を従来比25%向上した。

(3) 保護動作

過熱保護のためにIGBTチップに温度検出用のセンサを 内蔵し,HVIPMの制御回路に搭載している専用ICとの組 合せによって,高精度で応答性の良い保護動作を実現した。



"Rシリーズ"HVIPMの外観

RシリーズHVIPMでは3.3kV耐圧と6.5kV耐圧をラインアップしており、3.3kV耐圧のHVIPMは絶縁耐圧6kV、6.5kV耐圧のHVIPMは10.2kVの絶縁耐圧を持つパッケージを採用した。さらに、RシリーズHVIPMは従来のHVIPMの外形や電極端子配置などを変更せずに互換性を持たせており、素子の置き換えを容易に行うことを可能とした。

上村 仁*

梅嵜 勲* 森下和博* 中川良介**

1. まえがき

近年,世界的に環境問題が大きくクローズアップされる 中,CO₂排出量の少ない電気鉄道(以下"電鉄"という。)の 役割が非常に重要となってきている。

電鉄市場から高耐圧IGBTモジュール(以下"HVIGBT" という。)に対する要求は、高信頼性であることはもちろん のこと、低電力損失、大電流定格及び高温動作への対応が 期待されている。

当社はHVIGBTに駆動回路,保護機能を内蔵した鉄道 車両用電力変換装置に適用可能な大電力容量の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,多数の採用実績を誇っている。今回, 先に述べた要求性能を満足させるために,3.3/6.5kV耐圧 のRシリーズHVIPMを開発した。

本稿では、3.3kV耐圧のRシリーズHVIPMの電気的特性 を中心として、要求性能に対するRシリーズHVIPMの特 長と評価結果について述べる。

2. RシリーズHVIPMの特長

RシリーズHVIPMは、次に示す設計コンセプトを基本 として開発を行った。

- (1) 損失の低減:IGBTとDiodeを新規に開発し、低損失 化を図った。
- (2) 動作温度範囲の拡大:新構造のIGBT, Diodeの採用 とパッケージ材料の見直しによって最大動作温度150℃ を実現し、低温側も-50℃の動作を可能とした。
- (3) 定格電流アップ:従来のHVIPMに対して,25%の電 流定格アップを実現した。
- (4) 保護性能アップ:電流検出,温度検出をIGBTチップ に内蔵し、さらに制御基板に搭載している専用ICと組 み合わせて使用することによって高精度な保護を実現した。
- (5) 高信頼性:電鉄用途は高信頼性が要求されるため,安 全動作領域に対しても十分な破壊耐量を確保した。また, パッケージ構造の最適化によって信頼性も向上させた。

2.1 RシリーズIGBTチップ

IGBTチップは従来のPT (Punch Through)からLPT (Light Punch Through)構造に変更し、セル構造を最適化 することによってオン電圧 ($V_{CE(sat)}$)の低減を実現した。ま た、図1に示す出力特性が"温度が上昇するほどに電流が 減少する"負帰還特性になっており、並列接続時のHVIG-BT間の電流バランスは安定的に保たれ、複数のモジュー ルを並列接続して用いることも容易となる。図2は $V_{CE(sat)}$ と E_{off} のトレードオフカーブを示しており、従来のHVIPM に対して同一の E_{off} で比較した場合に、 $V_{CE(sat)}$ が25%低減 された。

2.2 動作温度拡大

従来のHVIPMの動作温度範囲は,IGBTとDiodeの電力 損失の増加による熱破壊や構成される材料の制約などか ら,-40℃から+125℃に制限されている。今回,新構造 のIGBTとDiodeの採用によって,電力損失を低減するこ とで高温動作を可能にした。また,温度範囲を制約する構 成材料として,絶縁性能を確保するために封入されている 充填(じゅうてん)材(シリコーンゲル)がその一つに挙げら れる。当社は材料メーカーと協力し,温度特性を大幅に改 善した新充填材を開発することによって,使用可能な動作 温度範囲を-50℃から+150℃まで拡大した。今回,動作 温度範囲の拡大を実現したことによって,システムの高出 力化や冷却器設計の自由度を高めることが可能となった。

2.3 定格電流アップ

3.3kV耐圧のRシリーズHVIPMの最大定格電流は、従来 の1,200Aに比べ25%増の1,500Aとすることができた。その 一例に、スイッチングキャリア周波数を係数としてインバ ータ出力電流を計算した結果を図3に示す。Tjmax = 125℃条件下で比較した場合、インバータ出力電流はスイ ッチングキャリア周波数500Hzで、現行比250A(約25%)





図2. RシリーズHVIPMと従来HVIPMのトレードオフ比較

増加でき,さらにTj=150℃とした場合は,約550A(約 55%)出力電流を増加させることが可能である。また,電 流増加に伴い,主電極発熱の影響が懸念されるため,内部 配線構造の最適設計によって配線抵抗を従来比50%低減さ せることで,定格電流アップを可能とした。

2.4 保護機能の精度アップ

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,かつ,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。

また,電鉄の場合,加速・減速などの動作頻度が高く, 積載量や乗車率,傾斜勾配(こうばい)の変化も多いことか ら,瞬間的な過電流や急激な温度変化なども想定されるた め,異常時の迅速な保護動作が必要不可欠となる。

RシリーズHVIPMではIGBTチップに電流センサを内蔵 しており、専用ICと組み合わせることで、より高精度な 過電流保護を実現している。

図4にRシリーズHVIPMの面内温度分布,図5にオン チップ温度センサの測定精度を示す。電流センサと同様に 温度センサもIGBTチップに内蔵しており,IR(赤外線放 射)カメラで表面温度を測定した結果とオンチップ温度セ ンサで測定した結果を比較すると,どの温度領域に対して も高精度でチップの温度を検出できていることがわかる。



図3. インバータ出力電流 (V_{cc}=1,800V, T_f=60℃, f₀=50Hz, P.F=1, Tjmax=125℃)



図4. 面内温度分布(T_f=25℃, I_c=900A)

また,制御基板に搭載している専用ICと組み合わせることで,応答性を向上した精度の高い過熱保護を実現した。

2.5 高破壊耐量

適用される市場の特殊性から,HVIPMには高い信頼性 が求められ,安全動作領域に対して十分な破壊耐量を持つ こともその一つに挙げられる。図6に,RシリーズHVIPM の最大接合温度150℃時の定格電流の3倍遮断(2,500V/ 4,500A)波形を示す。動作波形で異常な挙動などなく安定 した動作が確認できた。

図7にDiodeの逆回復波形を示す。IGBTと同様に接合 温度150℃で実施し、定格の2.5倍の順方向電流(2,500V/ 4,000A)を通電している。新構造のDiodeはソフトリカバ



図5. オンチップ温度センサ(6点測定)の温度測定精度



 $(V_{cc}=2,500V, I_F=4,000A, T_J=150^{\circ}C)$

リーとなる設計にしており,リカバリー時の振動などを抑 制し破壊耐量を向上させている。耐量試験では破壊耐量の 指標となるピーク損失が,スペック比の約3倍の余裕度が あることを確認した。

2.6 パッケージの互換性

図8に3.3kV耐圧RシリーズHVIPMの外観を示す。Rシ リーズHVIPMは従来のHVIPMの外形や電極端子配置,信 号のインタフェースを変更せず,パッケージの内部構造に ついて改良を行っている。これによって,既存システムか らの置き換えなども容易に行うことができる。

3. む す び

RシリーズHVIPMの適用によって,高温動作利用やインバータ損失の低減,出力電流の拡大が可能となり,主変換装置の小型化や高出力なシステムの構築が可能となった。

今後も多様化するユーザーからのニーズを反映した製品 開発を行い,更なる高性能かつ高信頼性の製品を提供して いく所存である。



図8.3.3kV耐圧RシリーズHVIPMの外観

参考文献

- (1) Iura, S., et al.: Development of New Generation3.3kV IGBT module, PCIM Europe (2006)
- (2) 小林知宏, ほか:鉄道車両用パワーデバイスの動向, 三菱電機技報, 83, No.11, 657~659 (2009)
- (3) 小林知宏, ほか:鉄道車両用パワーデバイスの動向,
 第46回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 513 (2009)