
第6世代Vシリーズ IGBT モジュール アプリケーションノート

第2章

－ 使用上の注意点 －

	目次	ページ
1	最大接合温度 $T_j(\max)$ の 175°C 化	2-2
2	短絡（過電流）保護	2-2
3	過電圧保護と安全動作領域	2-4
4	ドライブ条件とデッドタイム設定	2-12
5	並列接続	2-14
6	パッケージサイズの小型化	2-16
7	ソルダーフリー実装モジュールの系列化	2-17
8	マウンティングインストラクション	2-17

はじめに

第6世代Vシリーズ IGBT モジュールは、第5世代Uシリーズで技術開発した Field Stop(FS)構造とトレンチゲート構造を継承するとともに、更なるウェーハ厚の薄厚化、トレンチ構造の最適化を行ないました。これにより更なる特性改善を行ないました。

本章では第6世代Vシリーズ IGBT モジュールの使用上の注意点について述べます。

1 最大接合温度 $T_j(\max)$ の 175°C 化 – $T_j(\max)=175^\circ\text{C}$ 適用時のメリットと注意点–

最大接合部温度 $T_j(\max)$ について、第5世代 (U, U4 シリーズ) 以前の従来シリーズでは 150°C であるのに対し、第6世代の V シリーズでは 175°C となり、25°C の拡大をしました。

従来シリーズでは $T_j(\max)$ が 150°C に対して、一般的には連続動作温度 ($T_j(\text{op})$) は 125°C 付近で使用していましたが、V シリーズでは $T_j(\max)$ を 175°C にすることにより EIAJ の規格に基づいた長期信頼性を検証することで、150°C での連続動作保証が可能なモジュールとしました。

これによりインバータ適用レンジの拡大、適用モジュールや冷却フィンの小型化、出力電流やキャリア周波数の向上などのメリットがあります。

このように第6世代 V シリーズ IGBT モジュールでは連続運転時の最大接合温度 $T_{jop}(\max)$ が 150°C ですので、連続運転時にはその温度以下となるように動作条件を決定してください。またインバータの動作において、連続運転状態から短時間の過負荷運転で動作する場合がありますが、この場合には $T_j(\max)$ である 175°C までの適用が可能です。

一方、連続運転時の最大温度は 150°C ですので、その温度を超えて使用すると、パワーサイクル耐量などの製品寿命の低下を招く可能性がありますので注意してください。

2 短絡 (過電流) 保護

IGBT が短絡状態になると IGBT のコレクタ電流が増加し所定の値を超えるとコレクター-エミッタ間 (C-E 間) 電圧が急増します。この特性により、短絡時のコレクタ電流は一定の値以下に抑制されますが、IGBT には高電圧・大電流の大きな責務が印加された状態になりますので、可能な限り短時間でこの責務を取り除く必要があります。

図 1-1、1-2 には 1200V および 600V 系列の V シリーズにおける短絡発生時の印加電圧と短絡耐量 (保証短絡時間) の相関関係を示します。短絡検出時間に関しては、アプリケーションの動作条件とともに本相関関係を参考に設定してください。

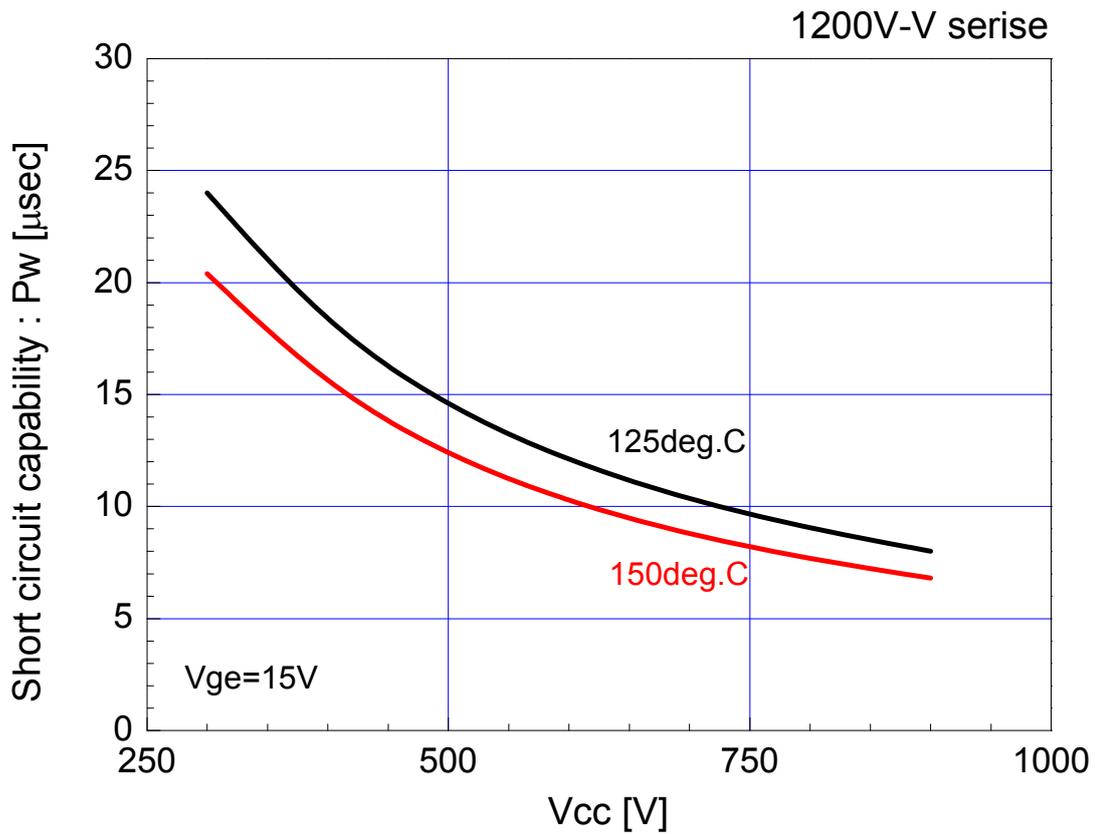


図 1-1 1200V の V シリーズでの短絡発生時の印加電圧と短絡耐量の相関関係

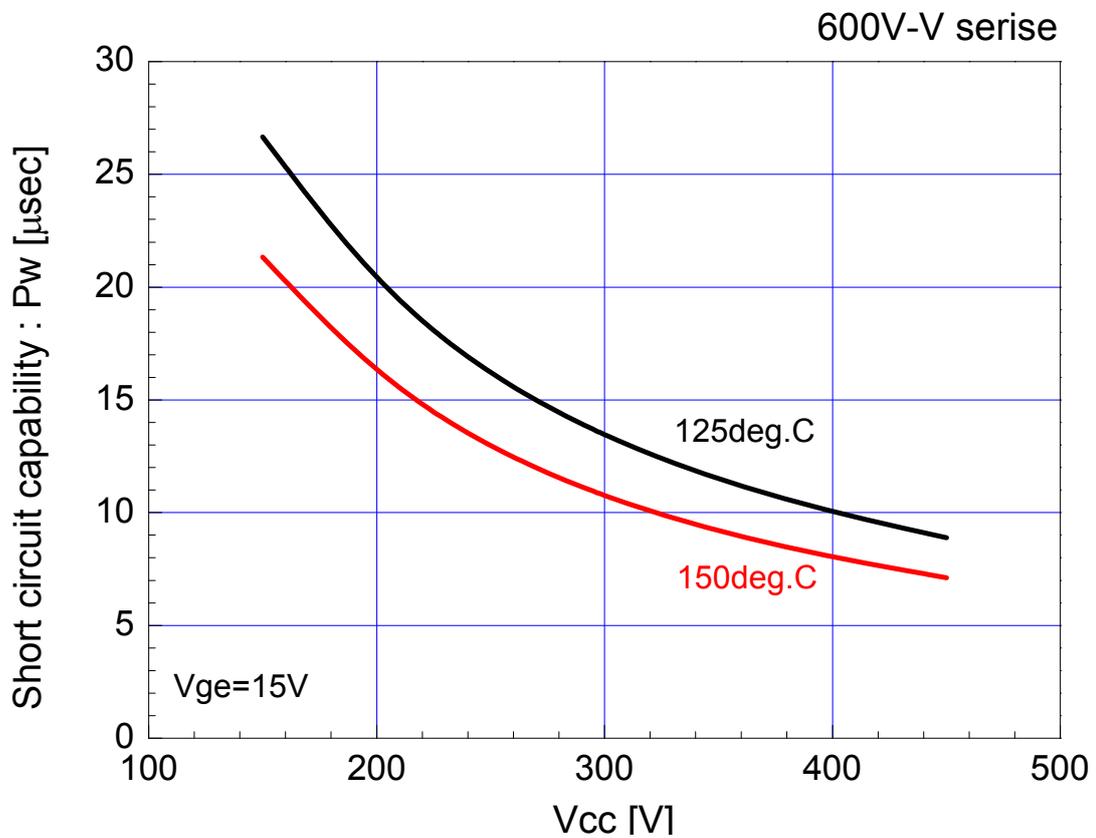


図 1-2 600V の V シリーズでの短絡発生時の印加電圧と短絡耐量の相関関係

3 過電圧保護と安全動作領域

3.1 過電圧保護

IGBT はスイッチング速度が速いため、IGBT ターンオフ時、または FWD 逆回復時に高い di/dt を発生し、モジュール周辺の配線インダクタンスとその di/dt によってサージ電圧が発生します。このサージ電圧が最大定格電圧を超えると過電圧印加状態となり、最悪の場合には破壊に至ります。これを抑制するためには、一般的にはスナバ回路を付加する、ゲート抵抗 R_g を調整する、主回路のインダクタンスを低減する方法などがあります。

図 2-1 にターンオフ波形と逆回復波形の概略図を示すとともに、サージ電圧の定義を示します。図 2-1 からわかるように、VCEP をターンオフ時に発生する IGBT のサージ電圧、VAKP を逆回復時に発生する FWD のサージ電圧としています。本節の図中に記載されている VCEP と VAKP は本定義を適用しています。

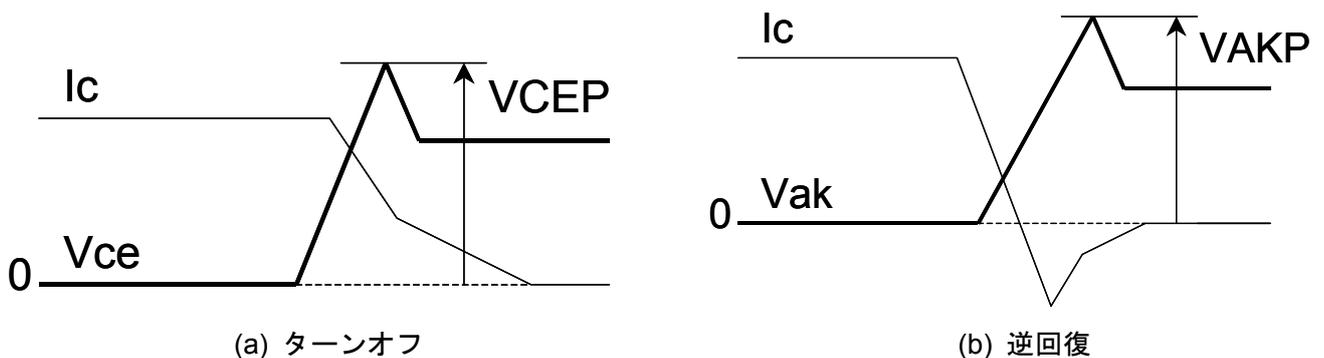


図 2-1 IGBT ターンオフ波形、FWD 逆回復波形の概略図とサージ電圧

サージ電圧の実際の特性として、Vシリーズの IGBT モジュール 2MBI450VN-120-50 でのサージ電圧特性例を示します。

図 2-2 はターンオフおよび逆回復時におけるサージ電圧の浮遊インダクタンス(Ls)依存性の一例を示します。この図からわかるように、浮遊インダクタンスが大きくなるとサージ電圧が高くなっていることがわかります。本例では特にターンオフサージへの影響が大きくなっていることがわかります。

図 2-3 は IGBT ターンオフ、FWD 逆回復時におけるサージ電圧のコレクタ電圧依存性の一例です。コレクタ電圧依存性が高くなるほどサージ電圧が高くなります。

図 2-4 は IGBT ターンオフ、FWD 逆回復時におけるサージ電圧の電流依存性の一例です。IGBT のターンオフ時のサージ電圧は、一般にコレクタ電流が大きいほうが高くなります。一方 FWD の逆回復サージ電圧は低電流側の方が高くなる傾向にあり、その最大値は定格電流に対して数分の 1 から数十分の 1 の低電流領域で現れます。

図 2-5 に FWD 逆回復時におけるサージ電圧のゲート抵抗依存性の一例を示します。なお電流条件は低電流の 45A と定格である 450A の 2 条件を示します。本図から低電流でゲート抵抗が小さくなるとサージ電圧が高くなっていることがわかります。

このように、IGBT モジュールに生じるサージ電圧の値は上記に示した主回路インダクタンス、ゲート駆動条件だけでなく、コンデンサ容量やゲートドライブの能力、スナバ回路の種類などの回路条件や使用条件によって大きく変わります。

したがって、IGBT モジュールの適用時にはそれを使用するインバータシステムなどの各種装置で、すべての動作条件においてサージ電圧が RBSOA 内におさまることを確認してください。サージ電圧が保証 RBSOA を超える場合には、ゲート抵抗の変更や浮遊インダクタンスの低減、スナバ回路の付加などによってサージ電圧を低減してください。なおゲート抵抗の変更によってサージ電圧を低減する際には、オン側とオフ側のゲート抵抗を個別に選定することで、より最適な駆動条件とすることが可能となります。

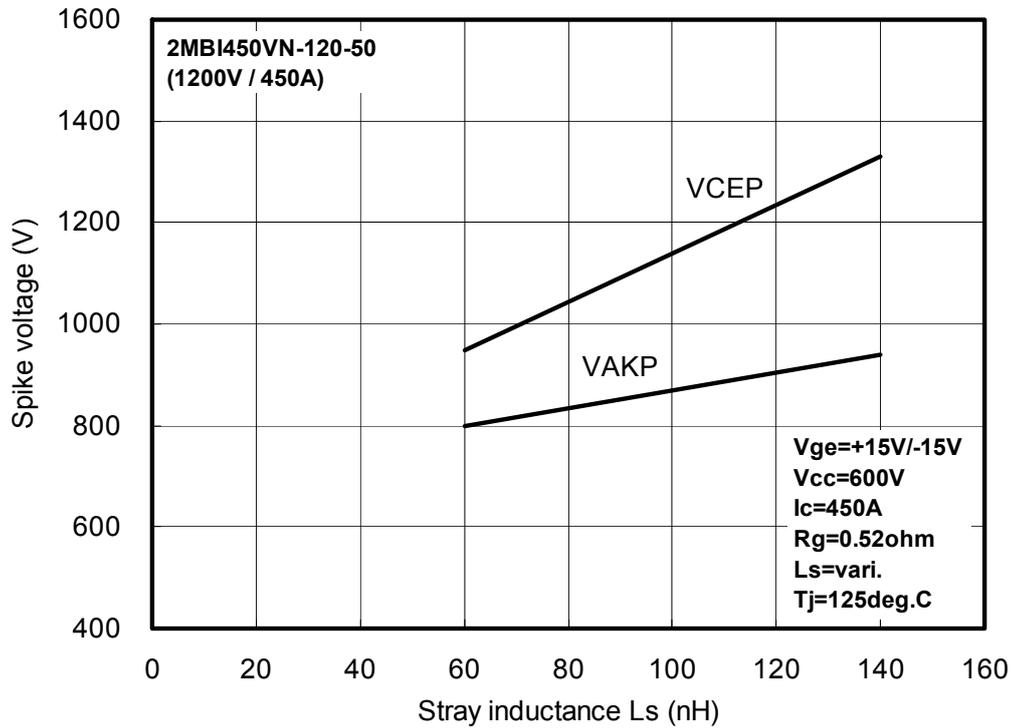


図 2-2 IGBT ターンオフ、FWD 逆回復時におけるサージ電圧の浮遊インダクタンス依存性の例

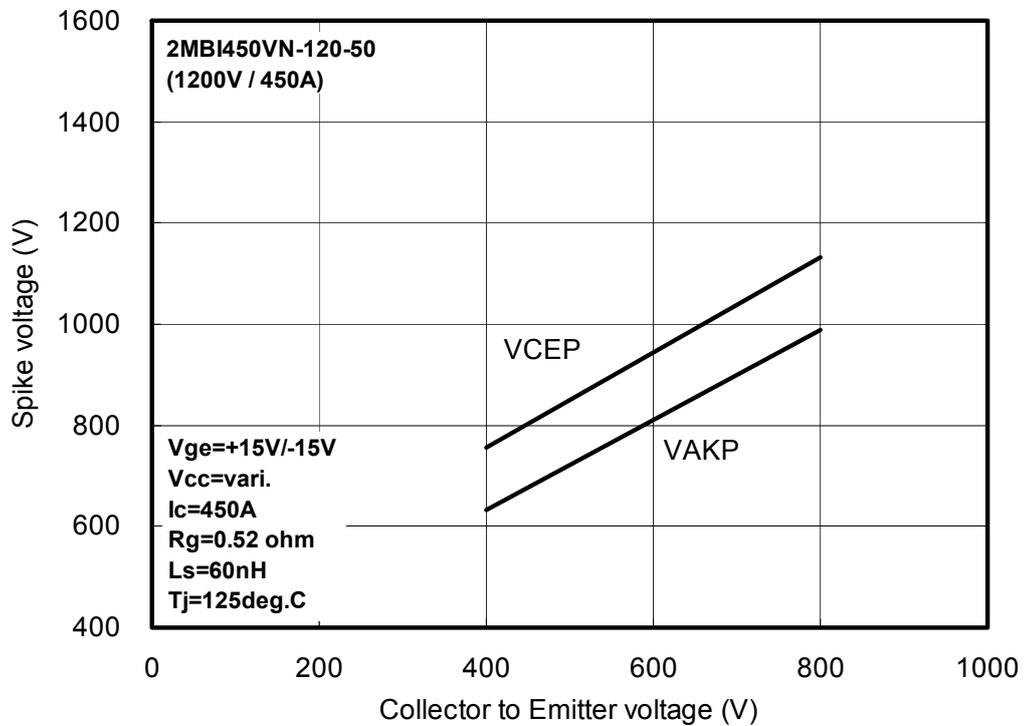


図 2-3 IGBT ターンオフ、FWD 逆回復時におけるサージ電圧のコレクタ電圧依存性の例

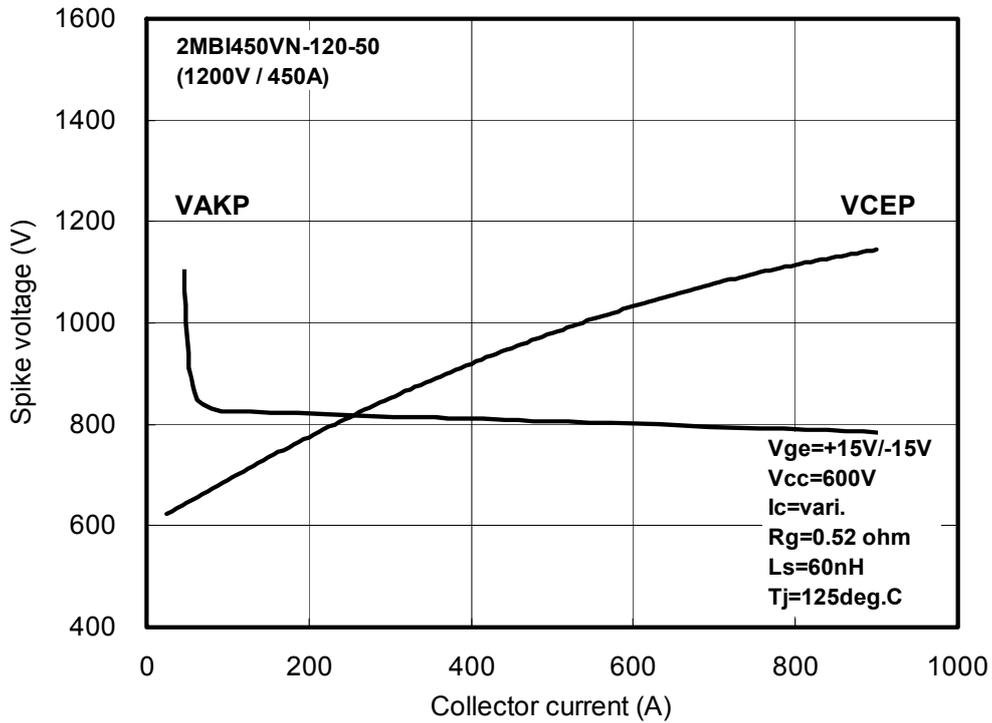


図 2-4 IGBT ターンオフ、FWD 逆回復時におけるサージ電圧の電流依存性の例

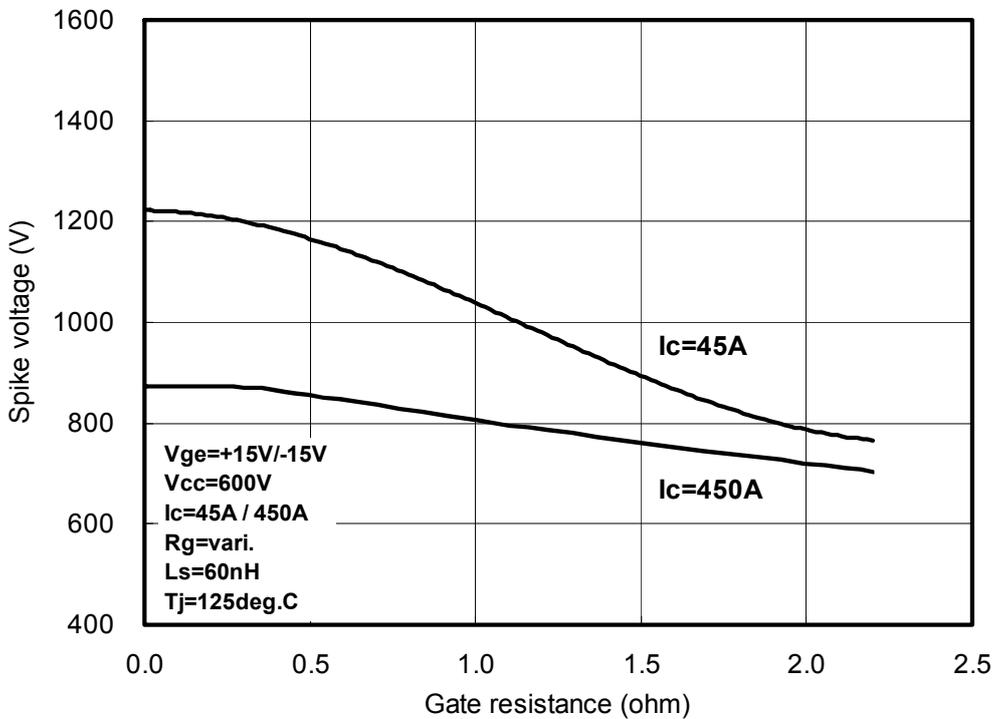


図 2-5 逆回復サージ電圧のゲート抵抗依存性の例(Ic=45A, 450A)

3.2 ターンオフ時におけるサージ電圧のゲート抵抗依存性

過電圧保護に関連して、図 2-6 に 1200V 系列での V シリーズ IGBT モジュールのゲート抵抗依存性を示します。

一般的にサージ電圧を抑制するためにはゲート抵抗を大きくする手法が用いられてきました。しかしながら IGBT の世代交代とともに IGBT チップの注入効率が高くなっているため、 R_g に対するサージ電圧依存性の傾向も変わってきています（詳細は下記の参考文献を参照願います）。

したがってサージ電圧抑制のためにゲート抵抗 R_g を大きくした場合、これまでの傾向と異なり、逆にサージ電圧が大きくなる場合がありますのでご注意ください。それゆえゲート抵抗の選定に関しては IGBT モジュールが使用される実機での確認を充分に行なってください。

参考文献

- 1) Y. Onozawa et al., "Investigation of carrier streaming effect for the low spike fast IGBT turn-off", Proc. ISPSD, pp173-176, 2006.

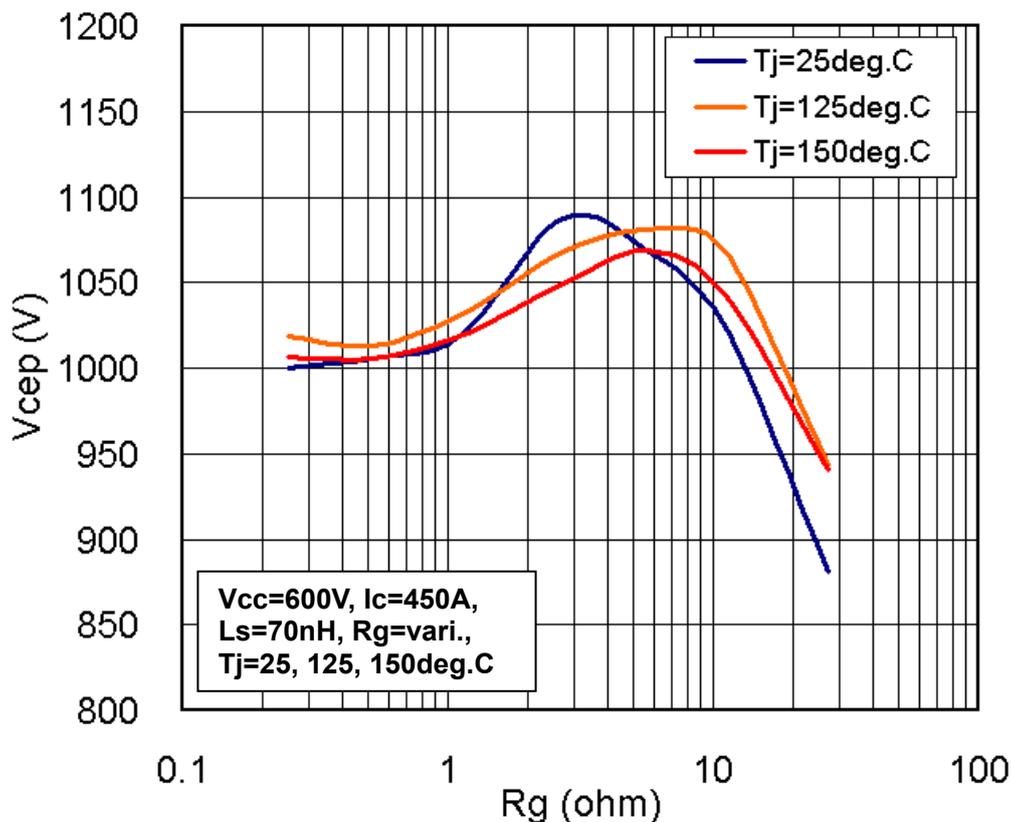


図 2-6 ターンオフサージ電圧のゲート抵抗依存性(1200V 系列)

3.3 短絡電流遮断時の過電圧保護

IGBT が短絡状態になると IGBT のコレクタ電流が急激に増加します。したがって短絡時の電流を遮断する際には、通常運転時に対して高エネルギーが印加された状態でのターンオフとなります。それゆえ、短絡電流遮断時の安全動作領域 SCSOA (Short Circuit Safe Operation Area)が通常の RBSOA に対して設けられています。

図 2-7 に 1200V 系列に対する V シリーズの SCSOA、RBSOA を示します。短絡遮断時のターンオフ動作について、SCSOA 内に $V_{CE}-I_C$ の動作軌跡が収まるようにしてください。また RBSOA が繰り返して定義されているのに対し、SCSOA が非繰り返してあることに注意してください。

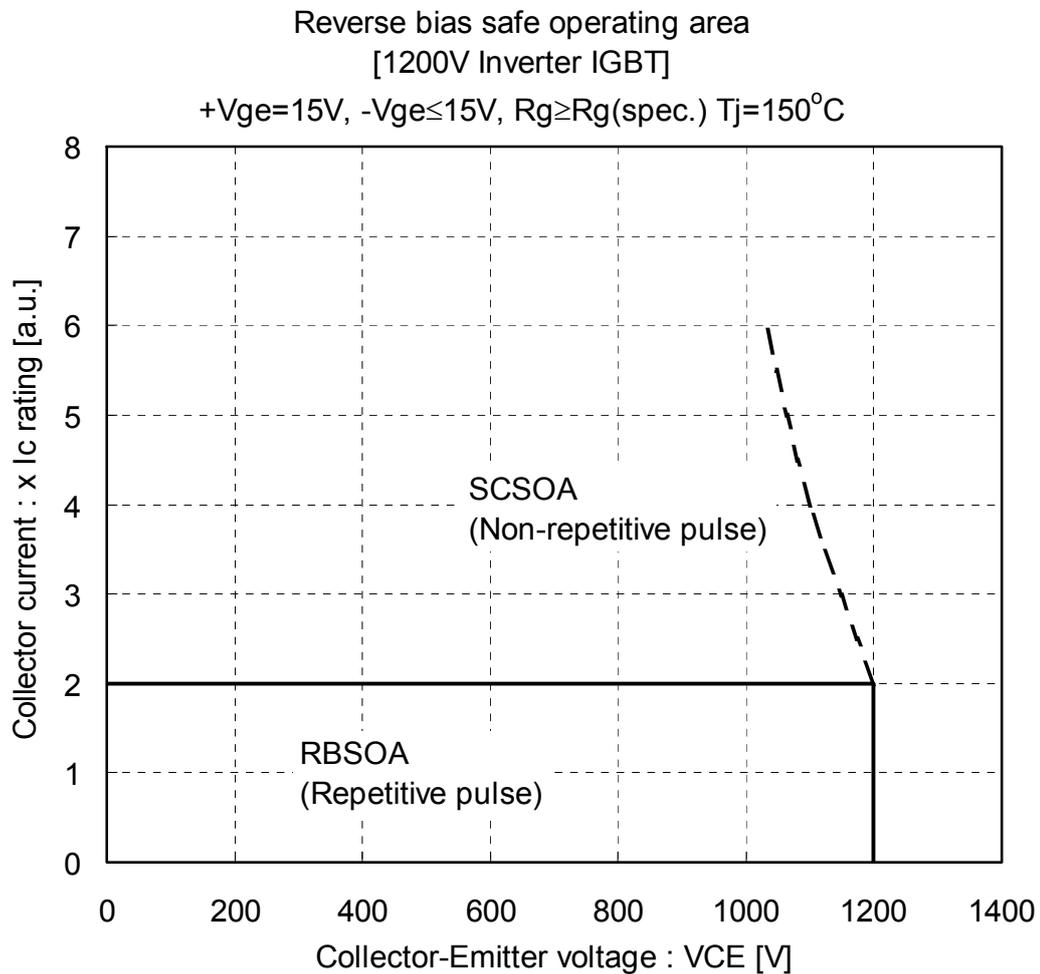


図 2-7 RBSOA と SCSOA (1200V 系列)

3.4 FWD の安全動作領域(SOA)

IGBT の逆バイアス安全動作領域(RBSOA)と同様に、FWD についても SOA が存在します。ダイオードの SOA は逆回復中に印加される電流と電圧の積である最大パワー(P_{max})が許容できるエリアとして示されます。したがって FWD 逆回復時の電流と電圧の軌跡(I-V 軌跡)は SOA 内となるように設計する必要があります。

図 2-8 に 1200V 系列における FWD の SOA の一例を示します。なお本図に記載の P_{max} は 1kW/A であり、電流定格で規格化して示しています。それゆえ 100A 定格に対する P_{max} は 100kW に相当します。

図 2-9 に逆回復波形の一例を示します。図 2-10 に FWD の SOA 上に示した図 2-9 の逆回復波形の I-V 軌跡を青線で示します。本例では I-V 軌跡が FWD の SOA 内であり、問題はありません。しかしながら同図の黒線で示される I-V 軌跡は SOA 外となっていますので、IGBT のオン側のゲート抵抗を大きくするなどにより対策する必要があります。なお特別な記載がない場合は SOA の電圧は主端子での電圧となります。

このように各種 IGBT モジュールを適用する装置のすべての運転条件で、FWD の I-V 軌跡が SOA 内となるようにゲートドライブ条件などを決定してください。

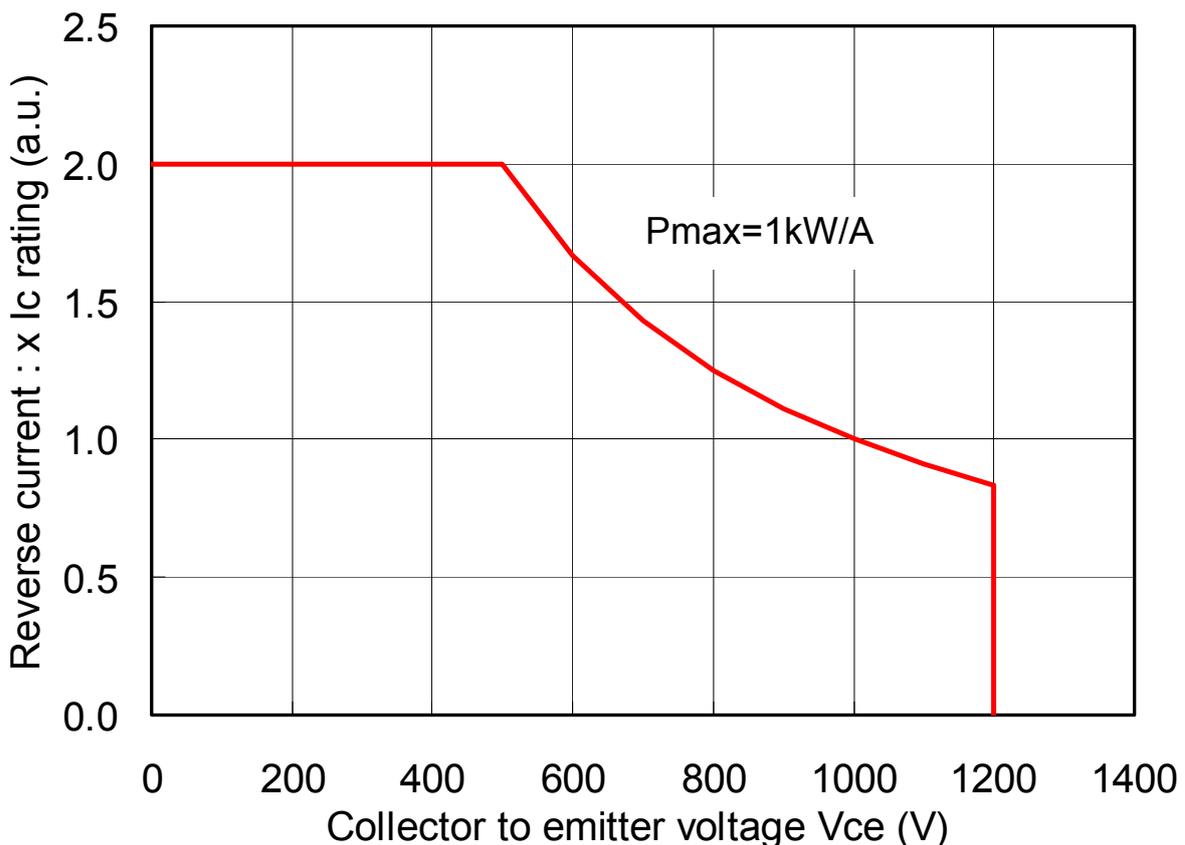


図 2-8 FWD の安全動作領域の一例 (1200V 系列)

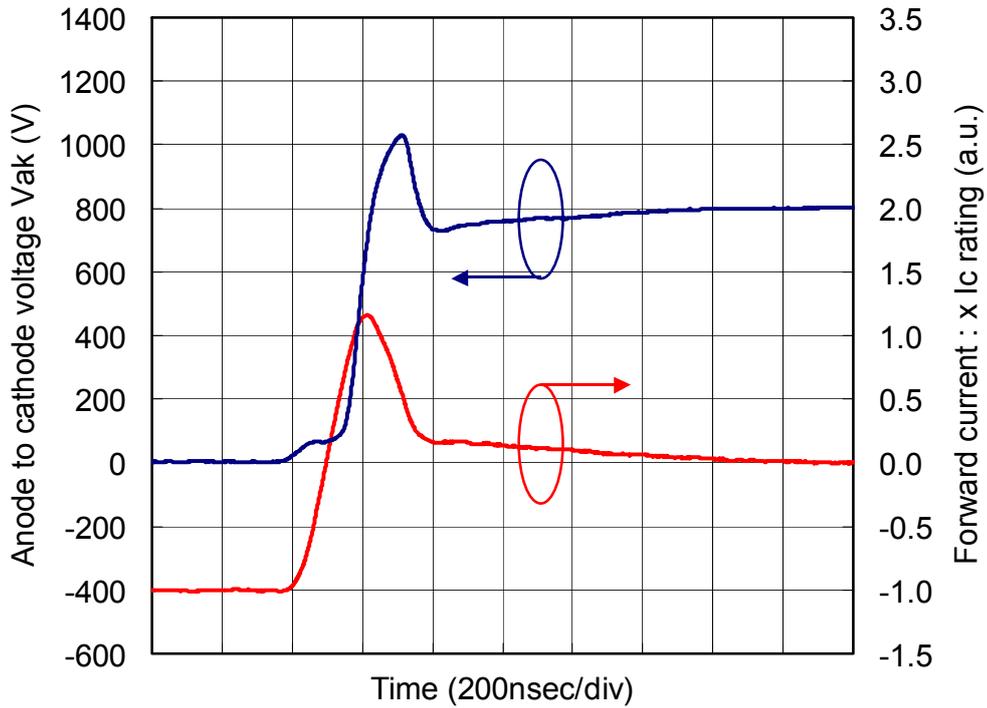


図 2-9 逆回復波形の一例

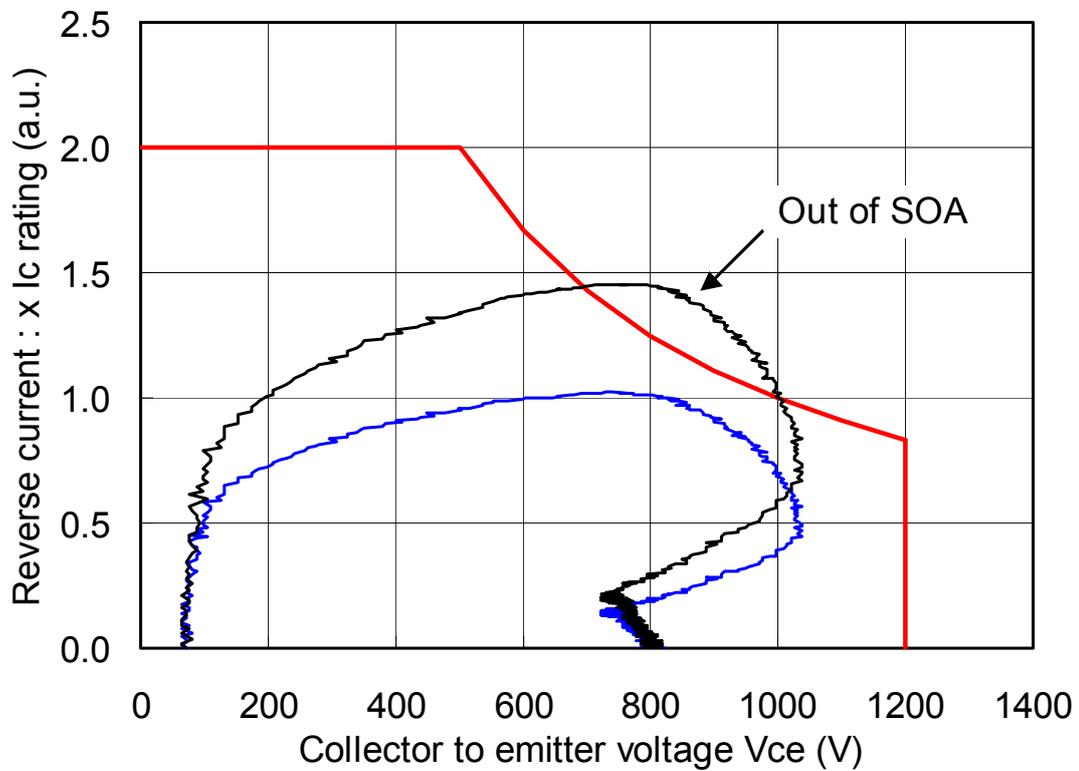


図 2-10 I-V 軌跡と SOA

4 ドライブ条件とデッドタイム設定

IGBT の主要特性は V_{GE} 、 R_G などのドライブ条件により変化するので装置の設計目標にあわせた設定が必要となります。ここでは、ゲートバイアス条件とデッドタイムの設定について述べます。

4.1 ゲート順バイアス電圧 : $+V_{GE}$ (オン期間)

ゲート順バイアス電圧 $+V_{GE}$ の推奨値は、+15V です。以下に、 $+V_{GE}$ の設計時の留意事項を示します。

- (1) $+V_{GE}$ は G-E 間最大定格電圧 20V 以下で設計して下さい。
- (2) 電源電圧の変動は $\pm 10\%$ 以内を推奨します。
- (3) オン期間中の C-E 間飽和電圧 ($V_{CE(sat)}$) は $+V_{GE}$ によって変化し、 $+V_{GE}$ が高い程低くなります。
- (4) ターンオンスイッチング時の時間や損失は $+V_{GE}$ が高い程小さくなります。
- (5) ターンオン時 (FWD 逆回復時) の対向アームのサージ電圧は $+V_{GE}$ が高い程発生しやすくなります。
- (6) IGBT がオフ期間中でも FWD の逆回復時の dv/dt により誤動作し、パルス状の短絡電流が流れて過剰な発熱や最悪の場合破壊を招く事があります。この現象は dv/dt 誤点弧と呼ばれ、 $+V_{GE}$ が高い程発生しやすくなります。
- (7) 一般には $+V_{GE}$ が高い程 制限電流値が高くなります。
- (8) 短絡耐量は $+V_{GE}$ が高い程小さくなります。

4.2 ゲート逆バイアス電圧 : $-V_{GE}$ (オフ期間)

ゲート逆バイアス電圧 $-V_{GE}$ の推奨値は -5V から -15V です。以下に $-V_{GE}$ の設計時の留意事項を示します。

- (1) $-V_{GE}$ は G-E 間最大定格電圧 20V 以下で設計して下さい。
- (2) 電源電圧の変動は $\pm 10\%$ 以内を推奨します。
- (3) IGBT のターンオフ特性は $-V_{GE}$ に依存し、特にコレクタ電流がオフし始める部分の特性は $-V_{GE}$ に強く依存します。従って、ターンオフスイッチング時の時間や損失は $-V_{GE}$ が大きい程小さくなります。
- (4) dv/dt 誤点弧は $-V_{GE}$ が小さい場合に発生することがあり、少なくとも -5V 以上に設定して下さい。ゲートの配線が長い場合には特に注意が必要です。

4.3 dv/dt 誤点弧を回避するために

図 3-1 は dv/dt 誤点弧の原因について示した図です。本図では IGBT1 側がオフ状態からオン状態に遷移するものとし、IGBT2 が逆バイアスされているものとします。

ここで IGBT1 がオフ状態からオン状態になると、その対向アームの FWD、すなわち FWD2 が逆回復します。またそれと同時に、オフ状態にある IGBT2 と FWD2 の電位が上昇するため、IGBT1 のスイッチング時間に応じた dv/dt が発生することになります。

IGBT1,2 にはそれぞれ帰還容量 C_{res} があるため、この C_{res} を介して電流 $I = C_{res} \times dv/dt$ が発生します。この電流がゲート抵抗 R_g によってゲート電位を上昇させ、結果としてゲート-エミッタ間の電圧 V_{ge} が生じることになります。この V_{ge} が IGBT2 の逆バイアス電圧と閾値電圧 $V_{ge(th)}$ の和の電圧を越えると IGBT2 が誤点弧（オン）することになります。これにより、IGBT1 と IGBT2 は短絡状態となります。

このような誤点弧を回避するために IGBT の逆バイアスは少なくとも -5V 以上に設定してください。なお逆バイアスの設定に関しては、実機での確認の上、適用をお願いいたします。

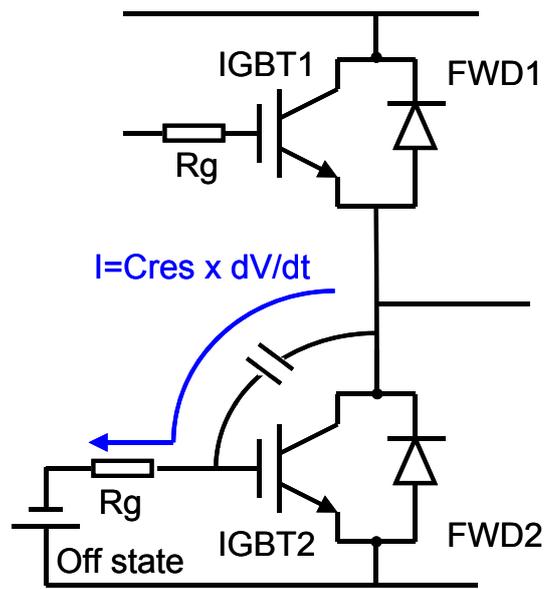


図 3-1 dv/dt 発生時の誤点弧の原理

4.4 デッドタイムの設定

インバータ回路などでは上下アームの短絡防止のため、オン・オフの切り換えタイミングにデッドタイムを設定する必要があります。図 3-2 に示すようにデッドタイム中は上下アームとも「オフ」の状態となります。デッドタイムは、基本的に IGBT のスイッチング時間($t_{off max.}$)より長く設定する必要があります。

例えば R_g を大きくするとスイッチング時間も長くなるのでデッドタイムも長くする必要があります。さらに、他のドライブ条件や温度特性等も考慮する必要があります。

このような背景から IGBT モジュールのデッドタイムは、3 μ sec 以上を推奨いたしますが、実際の適用に際しては実機にて十分な確認の上、デッドタイムの設定をお願いいたします。

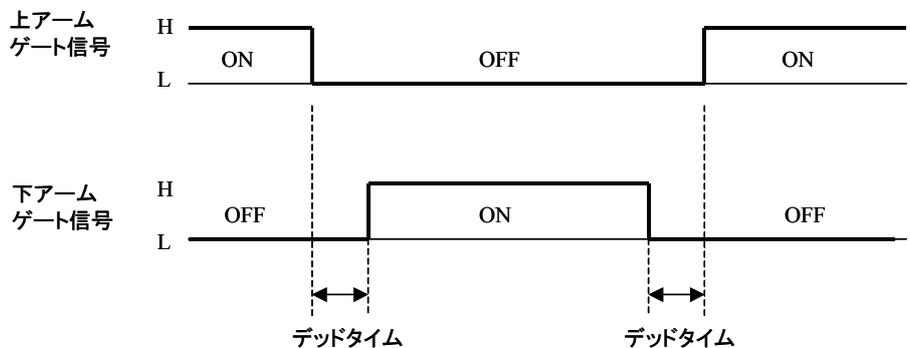


図 3-2 デッドタイム タイミングチャート

5 並列接続

IGBT モジュールを変換回路に適用する際に、通電電流能力向上を目的として IGBT モジュールを並列接続して使用場合があります。本章では V シリーズの IGBT モジュールを並列接続する際の留意点について記載します。

5.1 出力特性の接合温度依存性と電流アンバランス

出力特性の接合温度依存性はその挙動によって電流アンバランスに大きな影響を与えます。図 4-1 に V シリーズの代表的な出力特性を示します。図 4-1 からわかるように V-IGBT では T_j が高くなると V_{ce} が高くなるという正の温度依存性をもっています。IGBT の出力特性の接合温度依存性が正の場合では、接合温度の上昇とともにコレクタ電流は減少することになるため、自動的に電流アンバランスは改善されることとなります。

このように、V-IGBT ではその出力特性が正の接合温度依存性をもつため、並列運転に適した特性を持っています。このような正の温度係数を持つ出力特性の特徴は第四世代の S シリーズ以降より適用されており、V シリーズにおいても引き継がれています。

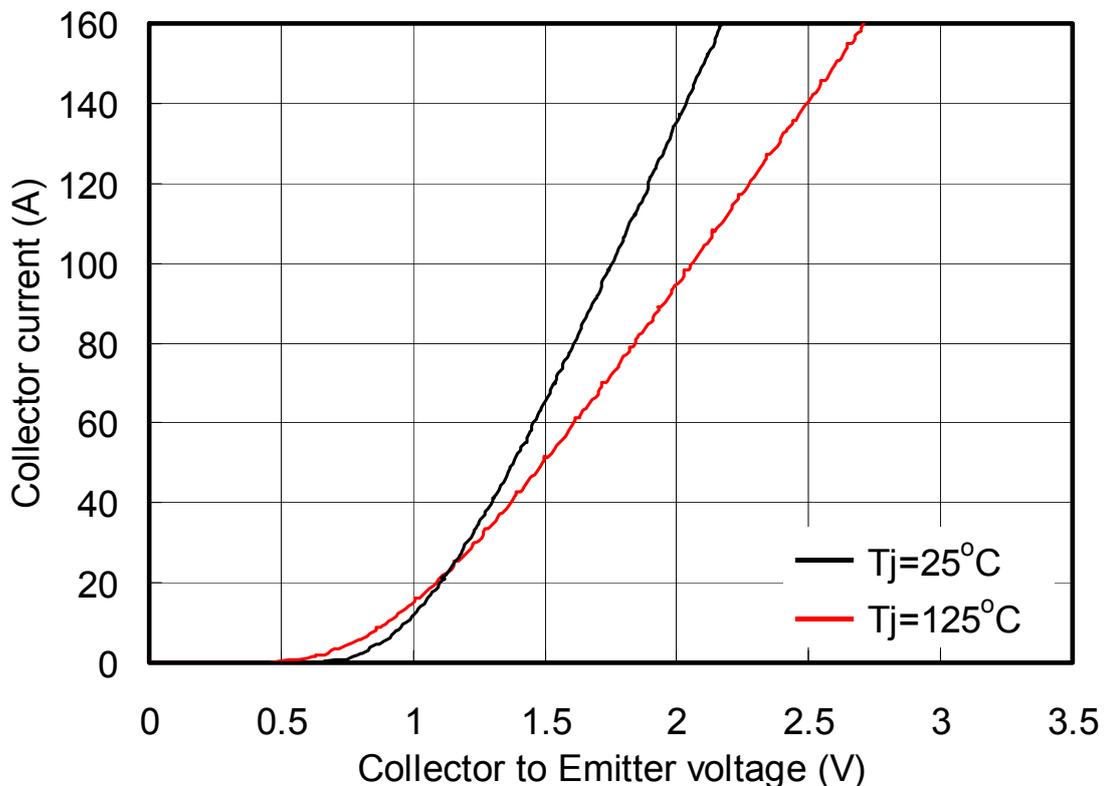


図 4-1 出力特性比較 (100A/1200V)

5.2 $V_{CE(sat)}$ のバラツキと電流アンバランス率

IGBT の並列接続時に生じる電流分担の割合は電流アンバランス率と呼ばれ、IGBT 自身の $V_{CE(sat)}$ のバラツキや出力特性の接合温度依存性によって決定されます。

図 4-2 に V シリーズ IGBT の 2 並列接続時における $V_{CE(sat)}$ のバラツキと電流アンバランス率の関係を示します。ここで電流アンバランス率は 2 並列接続時の低オン電圧側に流れる電流値 I_{C1} と平均電流値 $I_{C(ave)}$ により求められます。図 4-2 からわかるように、 $V_{CE(sat)}$ のバラツキが大きくなると電流アンバランス率が大きくなるのがわかります。それゆえ並列接続をする際には $V_{CE(sat)}$ の差 ($\Delta V_{CE(sat)}$) が小さい製品を組み合わせる事が重要となります。

$\Delta V_{CE(sat)}$ は同一製品ロットの IGBT モジュールを用いることにより最小にすることができます。これは様々なプロセス要因から生じる影響を最小にできるためです。したがって並列接続を行なう場合には、同一製品ロットでの並列接続を推奨いたします。

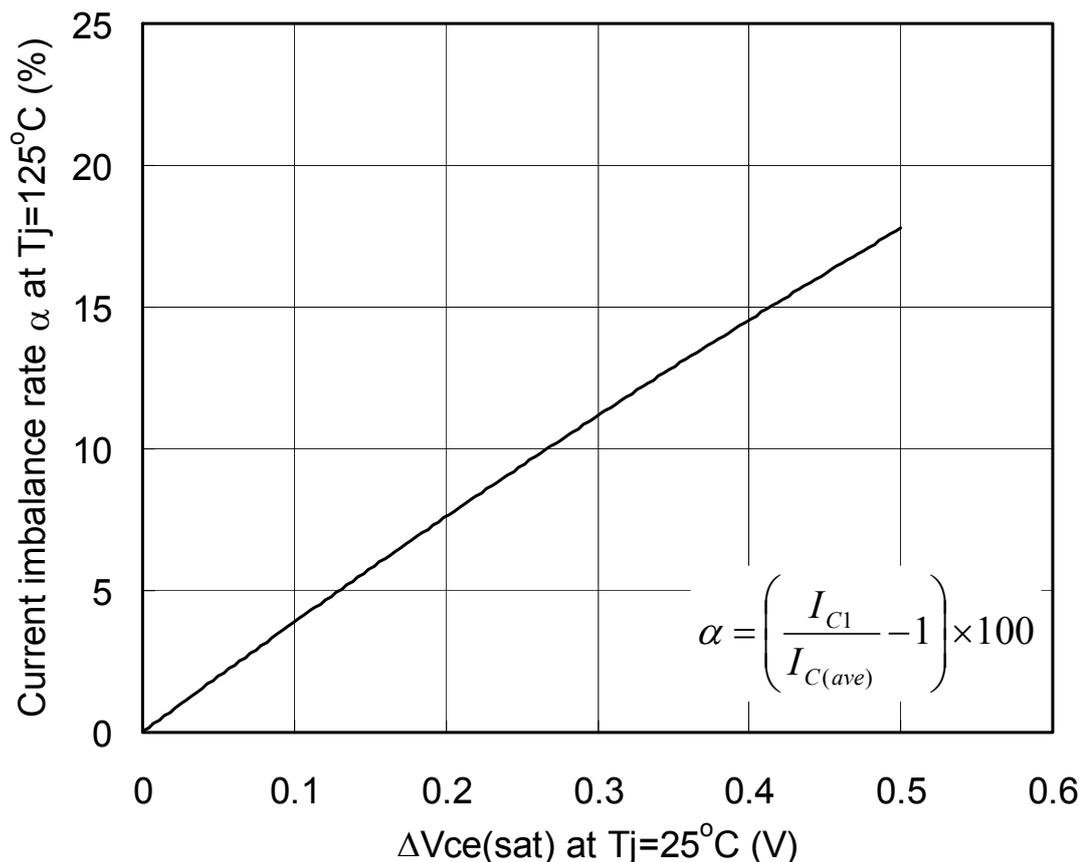


図 4-2 $V_{CE(sat)}$ のバラツキと電流アンバランス率(1200V 系)

6 パッケージサイズの小型化

今回量産化を開始しました第6世代「Vシリーズ」では、パッケージの更なる小型化を実現しました。これにより従来機種に対してインバータ装置の小型化が期待できます。

一方でパッケージの更なる小型化に伴い、主端子ピンに主電流を流す IGBT モジュールではそのモジュールに使用するプリント基板が不適切な場合には主端子ピンの温度が従来よりも上昇し、プリント基板の耐熱温度を超える可能性があります。それゆえ適切なプリント基板を使用して、主端子ピン温度とプリント基板の耐熱温度の整合をとってください。

加えてパッケージの小型化により熱密度が高くなり ΔT_j の増加が懸念されます。それゆえ実機での十分な熱評価を行ない、パワーサイクル寿命に影響がないことを確認して下さい。

図5-1、図5-2には6in1と2in1パッケージにおける小型化の変遷をそれぞれ示します。Vシリーズ IGBT モジュールでは従来モジュールに対して更なる小型化が実現されていることがわかります。なお製品のラインナップにつきましては、セレクションガイドを参照願います。

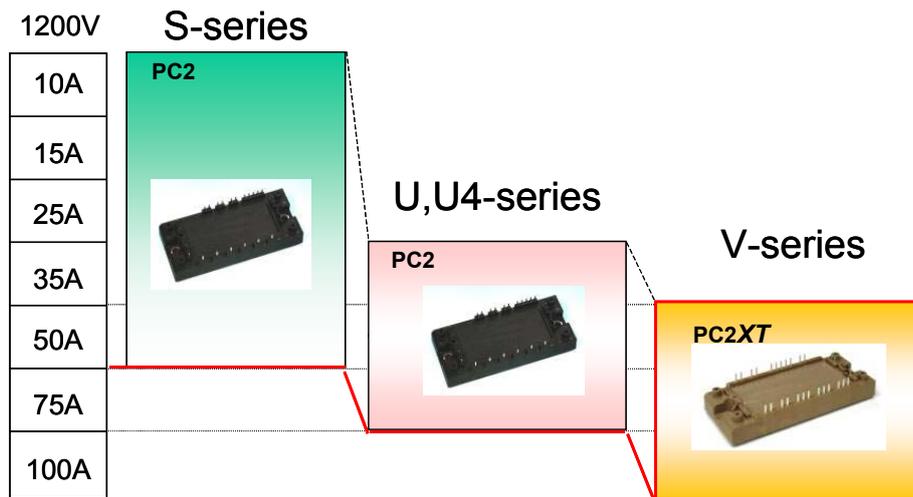


図 5-1 6in1(107 x 45 x 17mm)パッケージ

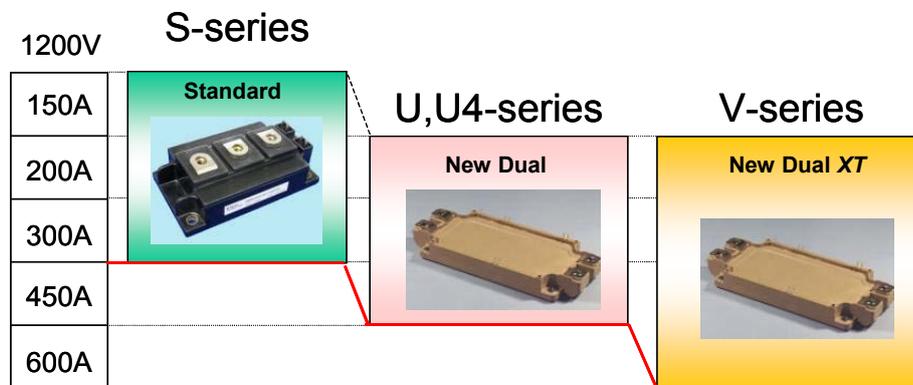


図 5-2 2in1(108 x 62 x 30mm / 122 x 62 x 17mm)パッケージ

7 ソルダフリー実装モジュールの系列化

図6-1には、制御端子がコイルスプリングであるスプリングコンタクトモジュールの外観写真を、図6-2に主端子、制御端子もバナナクリップのような形状をしているプレスフィットモジュールの外観写真を示します。このようなモジュールはインバータなどを動作させる制御基板のアセンブリ時に半田を用いない組立方法を採用することを可能とします。これによりネジ止めのみのアセンブリ工程で制御基板を取り付けることが可能となり、アセンブリ工程の簡略化を達成することができます。

富士電機はこのようなアセンブリ時の半田レス化の要求に対応できるように、スクリューやピン端子のモジュールだけでなく、半田レスでのアセンブリが可能な様々なソルダフリーモジュールの開発にも取り組んでいます。

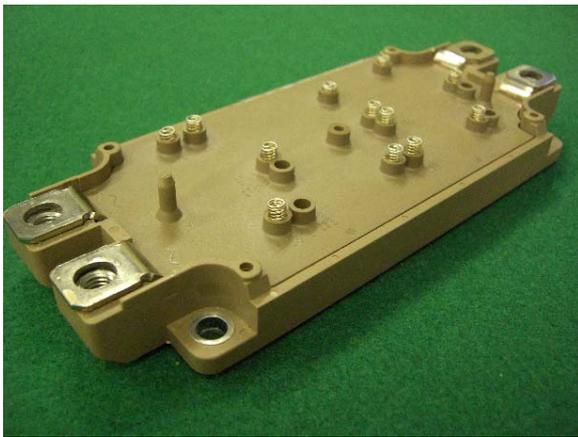


図6-1 スプリングコンタクトモジュールの外観写真



図6-2 プレスフィットモジュールの外観写真

8 マウンティングインストラクション

Vシリーズモジュールパッケージの実装方法については、マウンティングインストラクション（別途参照）に記載していますので、そちらを参照願います。

ご 注 意

- このカタログの内容（製品の仕様、特性、データ、材料、構造など）は2011年4月現在のものです。この内容は製品の仕様変更のため、または他の理由により事前の予告なく変更されることがあります。このカタログに記載されている製品を使用される場合には、その製品の最新版の仕様書を入手して、データを確認してください。
- 本カタログに記載してある応用例は、富士電機の半導体製品を使用した代表的な応用例を説明するものであり、本カタログによって工業所有権、その他権利の実施に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 富士電機（株）は絶えず製品の品質と信頼性の向上に努めています。しかし、半導体製品はある確率で故障する可能性があります。富士電機の半導体製品の故障が、結果として人身事故、火災等による財産に対する損害や、社会的な損害を起さぬように冗長設計、延焼防止設計、誤動作防止設計など安全確保のための手段を講じてください。
- 本カタログに記載している製品は、普通の信頼度が要求される下記のような電子機器や電気機器に使用されることを意図して造られています。

・コンピュータ	・OA機器	・通信機器（端末）	・計測機器	・工作機械
・オーディオビジュアル機器		・家庭用電気製品	・パーソナル機器	・産業用ロボット など
- 本カタログに記載の製品を、下記のような特に高い信頼度を持つ必要がある機器に使用をご予定のお客様は、事前に富士電機（株）へ必ず連絡の上、了解を得てください。このカタログの製品をこれらの機器に使用するには、そこに組み込まれた富士電機の半導体製品が故障しても、機器が誤動作しないように、バックアップ・システムなど、安全維持のための適切な手段を講じることが必要です。

・輸送機器（車載、船用など）	・幹線用通信機器	・交通信号機器	
・ガス漏れ検知及び遮断機	・防災／防犯装置	・安全確保のための各種装置	・医療機器
- 極めて高い信頼性を要求される下記のような機器及び戦略物資に該当する機器には、本カタログに記載の製品を使用しないでください。

・宇宙機器	・航空機搭載用機器	・原子力制御機器	・海底中継機器
-------	-----------	----------	---------
- 本カタログの一部または全部の転載複製については、文書による当社の承諾が必要です。
- このカタログの内容にご不明の点がありましたら、製品を使用する前に富士電機（株）または、その販売店へ質問してください。本注意書きの指示に従わないために生じたいかなる損害も富士電機（株）とその販売店は責任を負うものではありません。