第 2 章　使用上の注意点

1. 最大接合温度 T_{vj}, T_{vjop}	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	2-3
4. 並列接続	2-9
5. マウンティングインストラクション	2-10

© Fuji Electric Co., Ltd. All rights reserved.

第 7 世代 X シリーズ IGBT モジュールは、第 5 世代 U シリーズおよび第 6 世代 V 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いました。これにより更なる特性改善を実現しました。

本章では第 7 世代 X シリーズ IGBT モジュールの使用上の注意点について説明します。

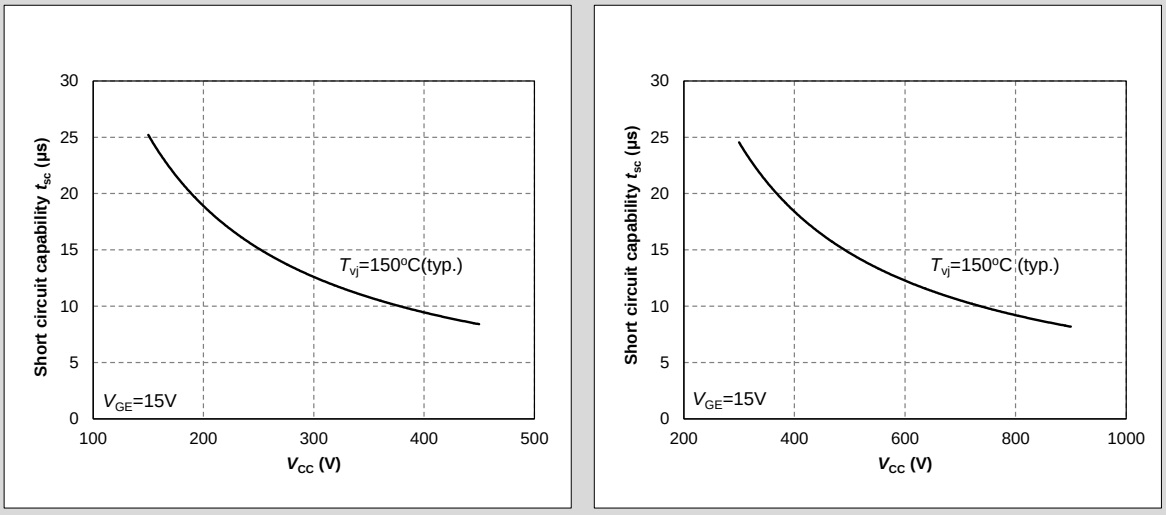
1. 最大接合温度 T_{vj}, T_{vjop}

第 7 世代 X シリーズ IGBT モジュールは連続運転時の最大接合温度 T_{vjop} が 175℃ですので、連続運転時にはこの温度以下となるように動作条件を決定してください。こ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-エミッタ間（C-E 間）電圧 V_{CE} 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 2-1 に 650V および 1200V 系列の X シリーズにおける短絡発生時の印加電圧 V_{CC} と短絡耐量（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。



(a) 650V モジュール　　(a) 1200V モジュール

図 2-1 X シリーズ IGBT モジュールの短絡耐量の印加電圧 V_{CC} 依存性(V_{GE}=15V)

© Fuji Electric Co., Ltd. All rights reserved.

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 d*i*/d*t* を発生し、モジュール周辺の配線インダクタンスとその d*i*/d*t* 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などの方法があります。

図 2-2 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。IGBT のターンオフ時に IGBT のコレクタ-エミッタ間に発生するサージ電圧を V_{CEP}、FWD の逆回復時に FWD のアノード-カソード間に発生するサージ電圧を V_{AKP} と定義しています。

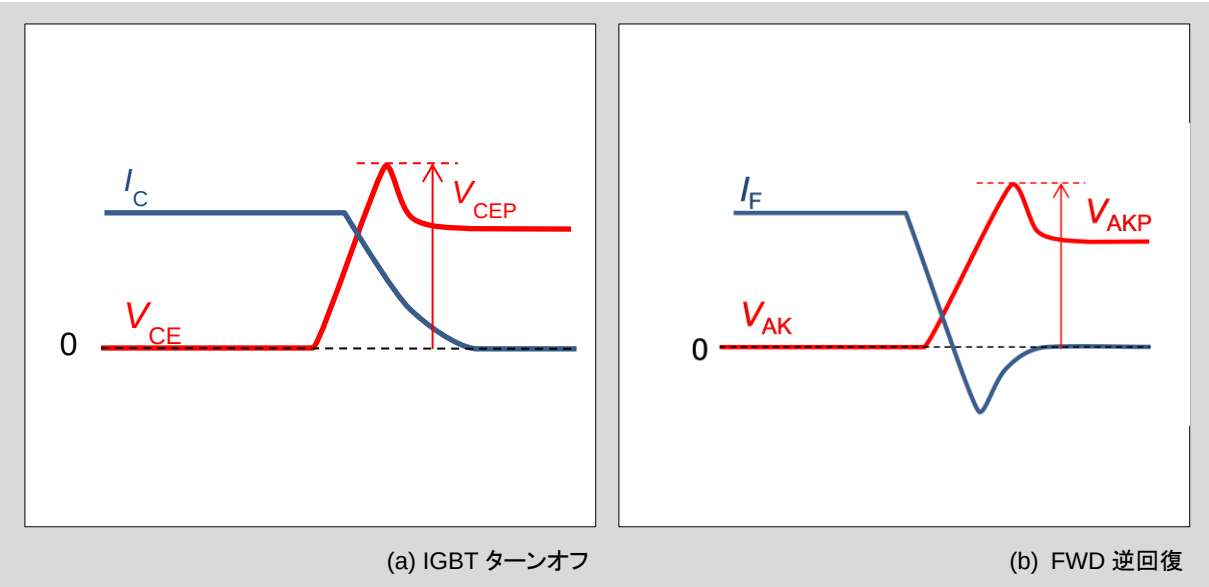


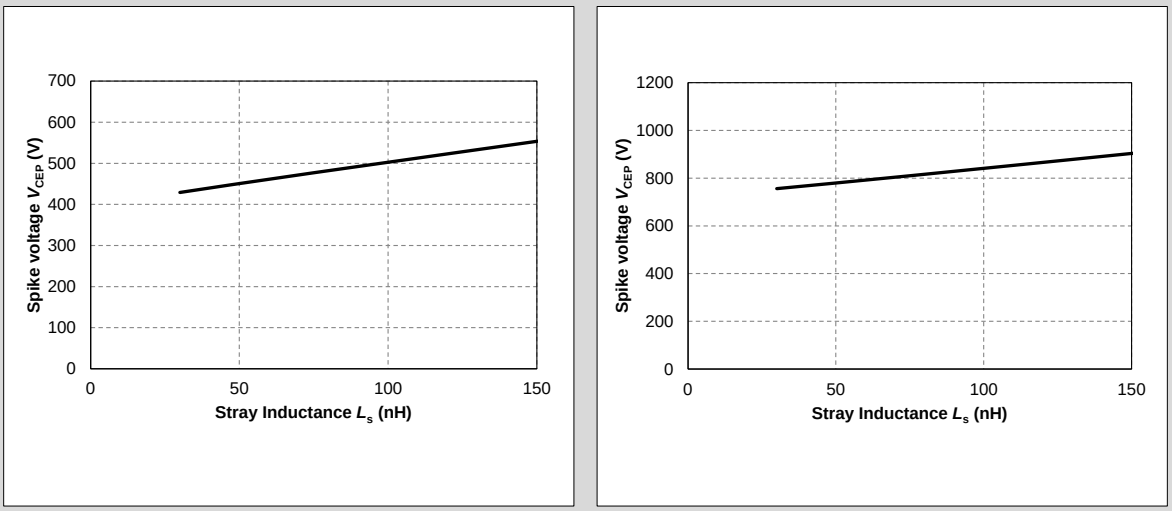
図 2-2 IGBT ターンオフ波形、FWD 逆回復波形の概略図とサージ電圧

サージ電圧の実際の特性について、X シリーズの IGBT モジュール 7MBR100XRA065-50（650V/100A）および 7MBR100XNA120-50（1200V/100A）を例としてその特徴を以下に述べます。

図 2-3 に IGBT ターンオフ時のサージ電圧 V_{CEP} の主回路浮遊インダクタンス(L_s)依存性の例を示します。この図からわかるように、L_s が大きくなるとサージ電圧 V_{CEP} が高くなっていることがわかります。そのため、サージ電圧を抑制するためには、主回路配線をラミネート構造にするなど浮遊インダクタンスを小さくする設計が求められます。

図 2-4 に V_{CEP} および FWD 逆回復時のサージ電圧 V_{AKP} の印加電圧 V_{CC} 依存性の一例を示します。V_{CC} が高くなるほどサージ電圧 V_{CEP} および V_{AKP} は高くなります。

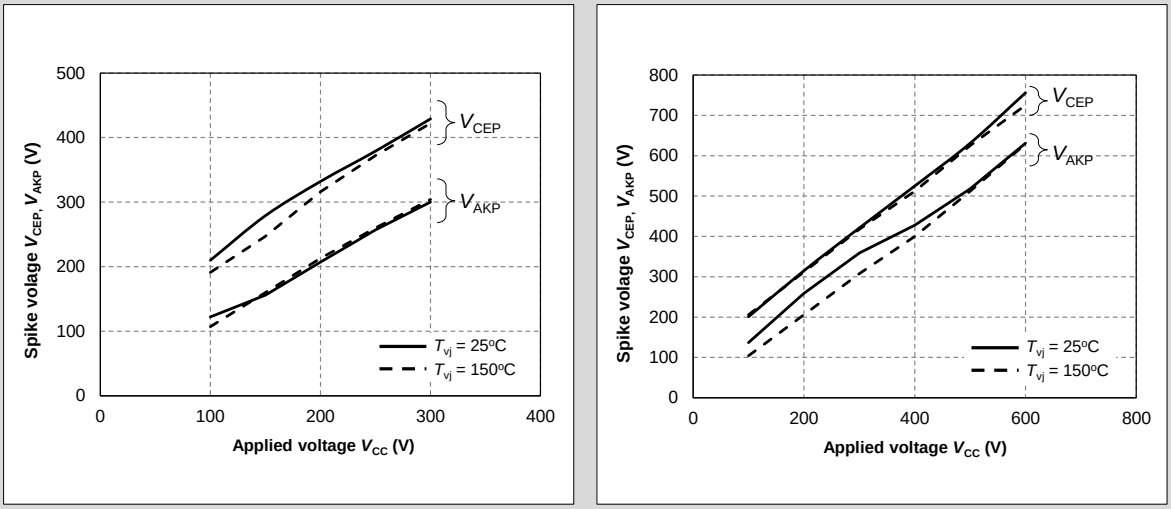
© Fuji Electric Co., Ltd. All rights reserved.



(a) 7MBR100XRA065-50 (650V/100A)
V_{CC}=300V, I_C=100A, R_G=27Ω

(b) 7MBR100XNA120-50 (1200V/100A)
V_{CC}=600V, I_C=100A, R_G=5.1Ω

図 2-3　IGBT ターンオフサージ電圧の浮遊インダクタンス L_s 依存性の例



(a) 7MBR100XRA065-50 (650V/100A)
V_{CC}=300V, I_C,I_F=100A, R_G=27Ω

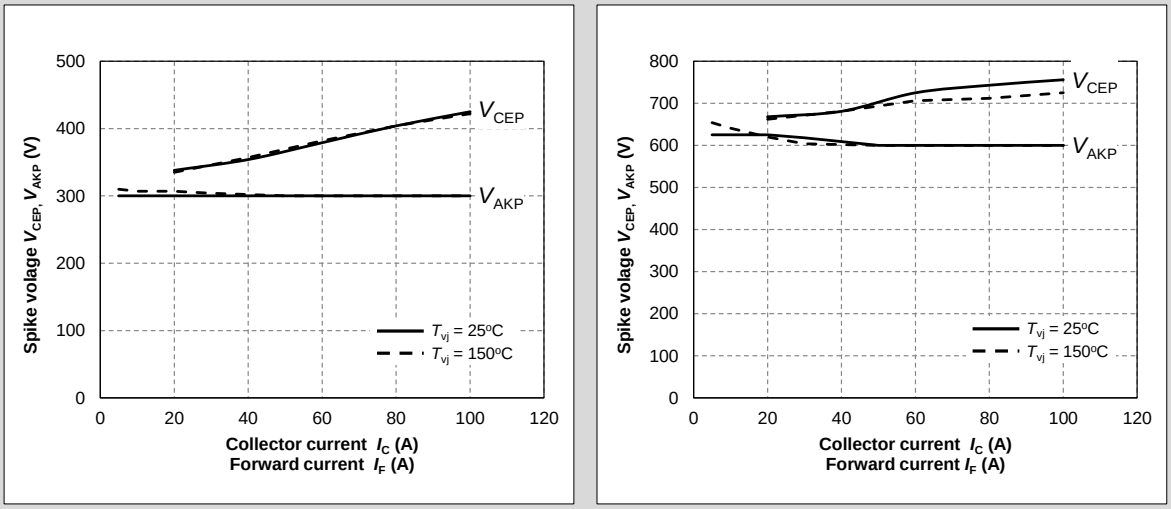
(b) 7MBR100XNA120-50 (1200V/100A)
V_{CC}=600V, I_C,I_F=100A, R_G=5.1Ω

図 2-4　IGBT ターンオフ、FWD 逆回復時におけるサージ電圧の印加電圧 V_{CC} 依存性の例

図 2-5 に V_{CEP} および V_{AKP} のコレクタ電流 I_C 依存性の一例を示します。V_{CEP} は I_C が大きいほど高くなります。一方 V_{AKP} は I_C が低電流の場合に高くなる傾向にあり、定格電流に対して数分の 1 から数十分の 1 の低電流領域で最大値となります。したがって、実際に使用される電流値でサージ電圧を正しく評価することが必要です。

図 2-6 に V_{AKP} のゲート抵抗値 R_G 依存性の一例を示します。なお電流条件はモジュール定格電流の 10 分の 1 の 10A と定格電流の 100A の 2 条件を示します。本図から低電流で R_G が小さくなると V_{AKP} が高くなっていることがわかります。

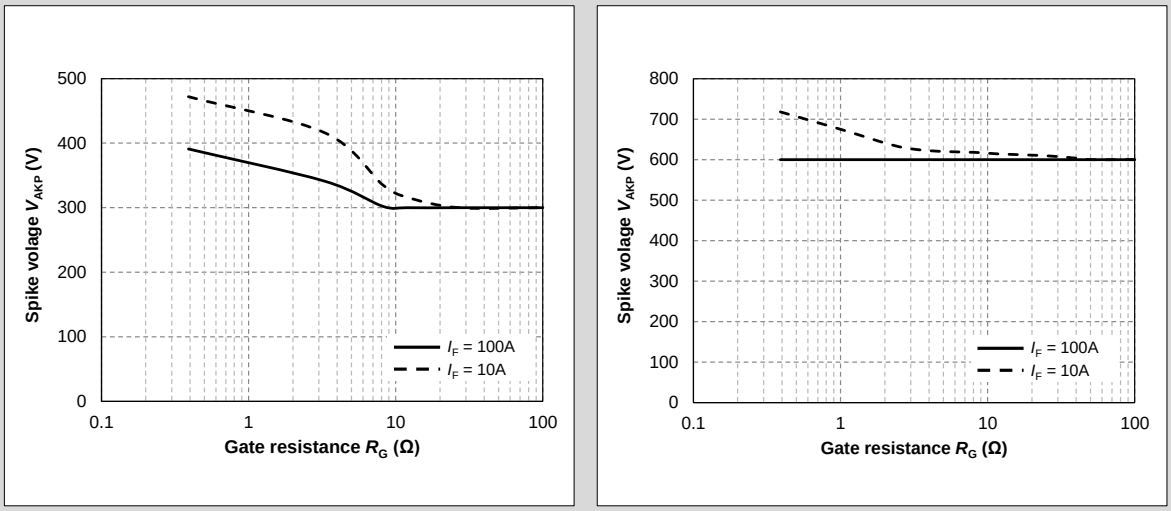
© Fuji Electric Co., Ltd. All rights reserved.



(a) 7MBR100XRA065-50 (650V/100A)
V_{CC}=300V, R_G=27Ω

(b) 7MBR100XNA120-50 (1200V/100A)
V_{CC}=600V, R_G=5.1Ω

図 2-5　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流 I_C 依存性の例



(a) 7MBR100XRA065-50 (650V/100A)
V_{CC}=300V, T_{vj}=25°C

(b) 7MBR100XNA120-50 (1200V/100A)
V_{CC}=600V, T_{vj}=25°C

図 2-6　FWD 逆回復時におけるサージ電圧のゲート抵抗依存性の例

以上のように、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浮遊インダクタンス L_S、スイッチング条件、ゲート駆動条件によって大きく変化します。その他にも、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使用条件によっても影響を受けます。

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において、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

© Fuji Electric Co., Ltd. All rights reserved.

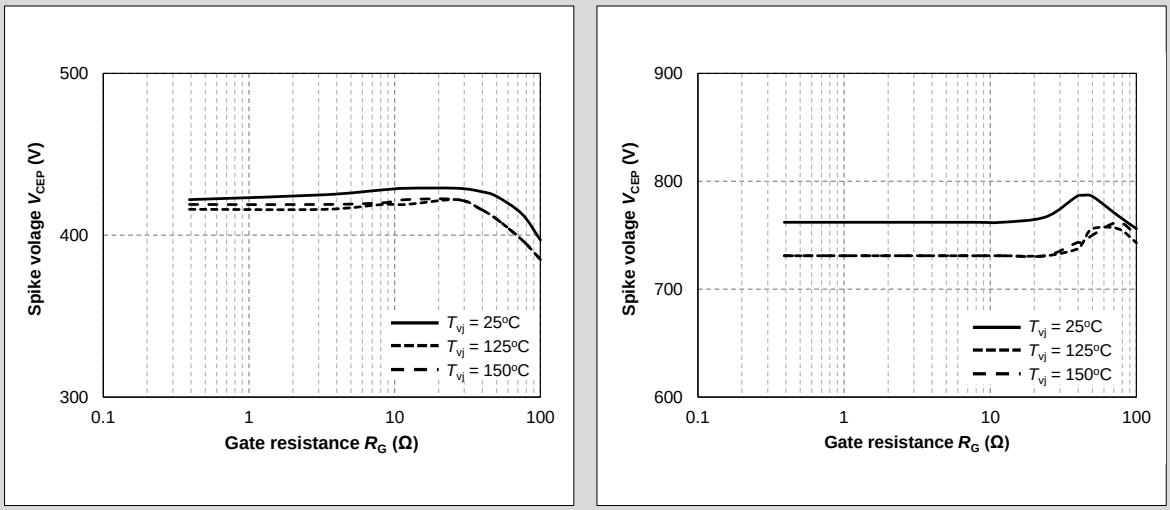
路の付加などによってサージ電圧を低減してください。なおゲート抵抗の変更によってサージ電圧を低減する際には、オン側とオフ側のゲート抵抗を個別に選定することで、より最適な駆動条件とすることが可能となります。

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 2-7 に 1200V 系列での X シリーズ IGBT モジュールのターンオフサージ電圧 V_{CEP} のゲート抵抗値 RG 依存性を示します。

第 4 世代以前（S シリーズ以前）の IGBT モジュールでは、一般的にサージ電圧を抑制するためにはゲート抵抗値 R_G 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 R_G を大きくした場合、旧世代製品の傾向と異なり、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 R_G 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十分に行なってください。



(a) 7MBR100XRA065-50 (650V/100A) V_{CC}=300V

(b) 7MBR100XNA120-50 (1200V/100A) V_{CC}=600V

図 2-7　ターンオフサージ電圧 V_{CEP} のゲート抵抗値 R_G 依存性の例

参考文献

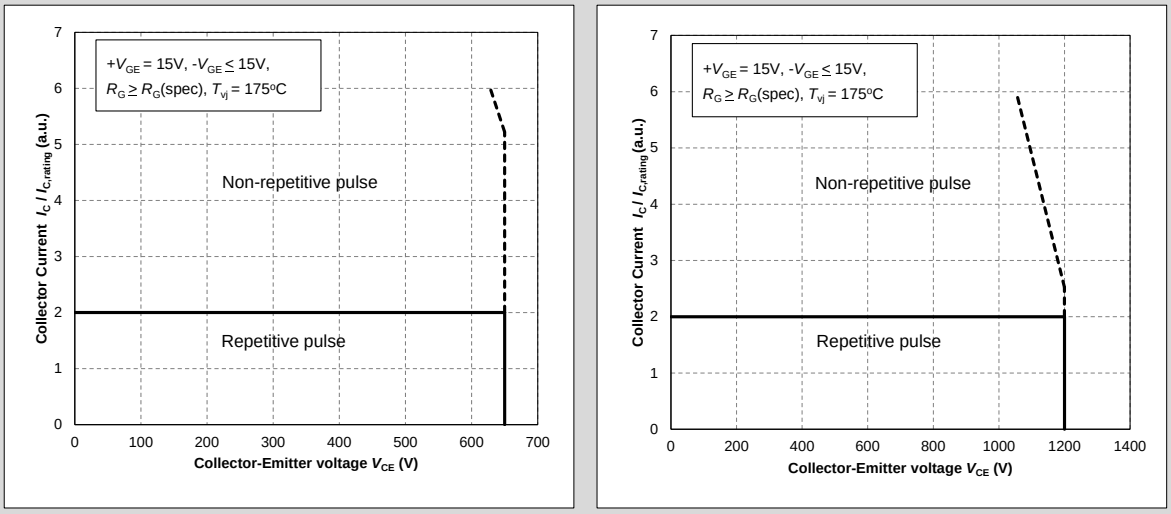
1) Y. Onozawa *et al.*, “Investigation of carrier streaming effect for the low spike fast IGBT turn-off”, *Proc. ISPSD*, pp. 173-176, 2006.

© Fuji Electric Co., Ltd. All rights reserved.

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 I_C 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、通常の連続動作における RBSOA（逆バイアス安全動作領域）に対して、短絡電流遮断時には非繰り返しの条件で定義される RBSOA (Non-repetitive pulse)が設けられています。

図 2-8 に X シリーズ 650V 系列および 1200V 系列における繰り返しパルスでの RBSOA (Repetitive pulse)、非繰り返しパルスでの RBSOA (Non-repetitive pulse)を示します。短絡遮断時のターンオフ時の V_{CE} – I_C の動作軌跡が RBSOA (Non-repetitive pulse)内に収まるように使用してください。なお特別な記載が製品の仕様書にない場合は RBSOA の電圧 V_{CE} はモジュールのコレクタおよびエミッタ主端子で測定した電圧となります。



(a) 650V 定格モジュール　　(b) 1200V 定格モジュール

図 2-8 逆バイアス RBSOA

3.4 FWD の安全動作領域(SOA)

IGBT の RBSOA と同様に、FWD に関しても SOA が存在します。FWD の SOA は逆回復中に印加される電流 I_F と電圧 V_{AK} 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 V_{AK} – I_F 軌跡が SOA 内に収まるように設計する必要があります。なお特別な記載が製品の仕様書にない場合は SOA の電圧 V_{AK} はモジュールの主端子で測定した電圧となります。

© Fuji Electric Co., Ltd. All rights reserved.

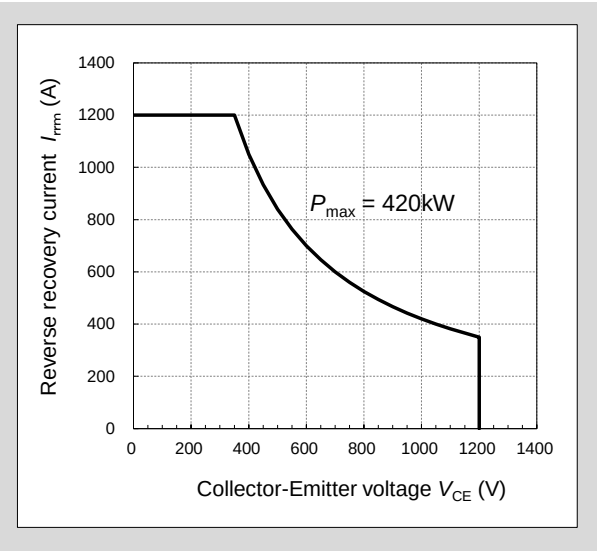
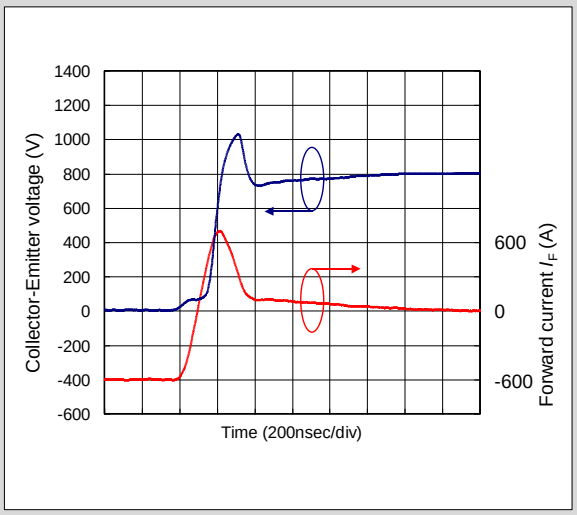


図 2-9 FWD の安全動作領域(SOA)の例

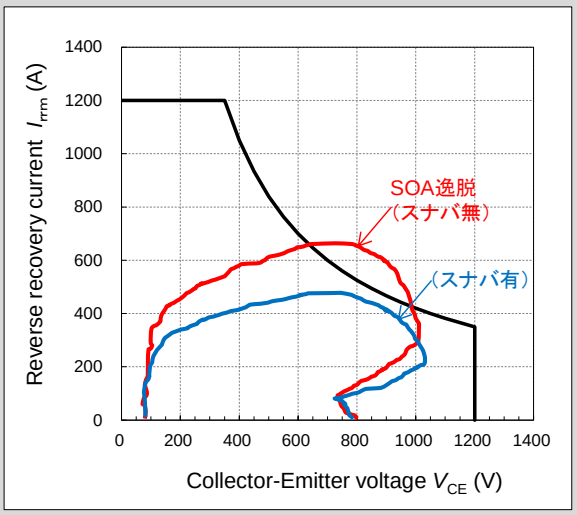
図 2-9 に 1200V 系列 2MBI600XNE120-50 における FWD の SOA を示します。本図に記載の P_{max} は 420kW となります。

図 2-10(a)に逆回復波形の一例を示します。その逆回復波形の V_{AK} – I_F 軌跡を図 2-10(b)の青線に示します。この場合では V_{AK} – I_F 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赤線で示される V_{AK} – I_F 軌跡は SOA を越えていますので、FWD が破壊する恐れがあります。IGBT のオン側のゲート抵抗値を大きくするなどし、V_{AK} – I_F 軌跡が SOA 内に収まるよう対策する必要があります。

このように各 IGBT モジュールを適用する装置のすべての運転条件において、FWD の V_{AK} – I_F 軌跡が SOA 内となるようにゲート駆動条件などを決定してください。



(a) FWD 逆回復時の波形例



(b) FWD 逆回復時の I-V 軌跡と SOA

図 2-10 FWD 逆回復時の波形と I-V 軌跡

© Fuji Electric Co., Ltd. All rights reserved.

4. 並列接続

IGBT モジュールを適用する際に、通電電流能力向上を目的として IGBT モジュールを並列に接続して使用する場合があります。本章では X シリーズ 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。

4.1 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 T_{vj} 依存性はその挙動によって、並列接続されたモジュール間の電流アンバランスに大きな影響を与えます。図 2-11 に X シリーズ IGBT モジュールの代表的な出力特性（$V_{CE(sat)}$ - I_C 依存性）を示します。図 2-11 からわかるように、X シリーズ IGBT では T_{vj} が高くなると $V_{CE(sat)}$が大きくなるという正の温度依存性を持っています。IGBT の出力特性の T_{vj} 依存性が正の場合では、T_{vj} の上昇とともにコレクタ電流 I_C 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になります。

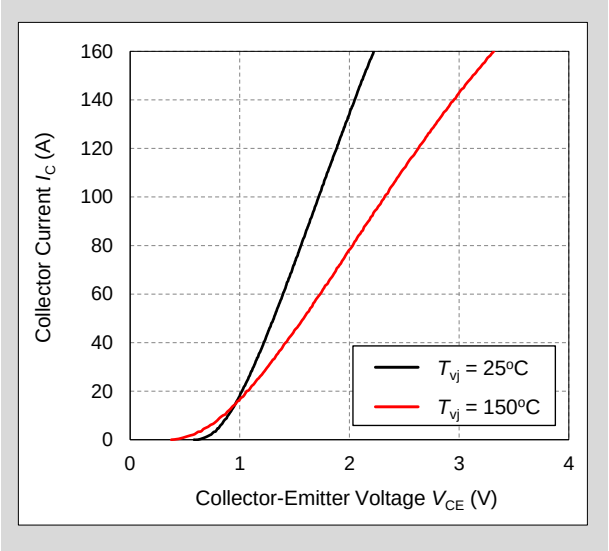


図 2-11 IGBT 出力特性の T_{vj} 依存性（1200V/100A）

このように、X シリーズ IGBT モジュールは出力特性が正の接合温度依存性を持つため、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 4 世代の S シリーズ以降より適用されており、X シリーズにおいても引き継がれています。

4.2 $V_{CE(sat)}$のバラつきと電流アンバランス率

IGBT モジュール並列接続時に生じる各モジュール間の電流分担の割合は電流アンバランス率 α 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 2-12 に X シリーズ IGBT の 2 並列接続時における $V_{CE(sat)}$のバラツキ $\Delta V_{CE(sat)}$と電流アンバランス

© Fuji Electric Co., Ltd. All rights reserved.

率 α の関係を示します。電流アンバランス率 α は、2 つのモジュールを並列接続した場合に低 $V_{CE(sat)}$ 側に流れる電流値を I_{C1}、2 つのモジュールの平均電流値を $I_{C(ave)}$ (=I_{C1}/2 + I_{C2}/2)とすると、式 2-1 を用いて求められます。

この図からわかるように、$V_{CE(sat)}$のバラツキが大きくなると電流アンバランス率 α は大きくなります。それゆえ、IGBT モジュールを並列接続をする際には $\Delta V_{CE(sat)}$が小さい製品を組み合わせることが重要となります。

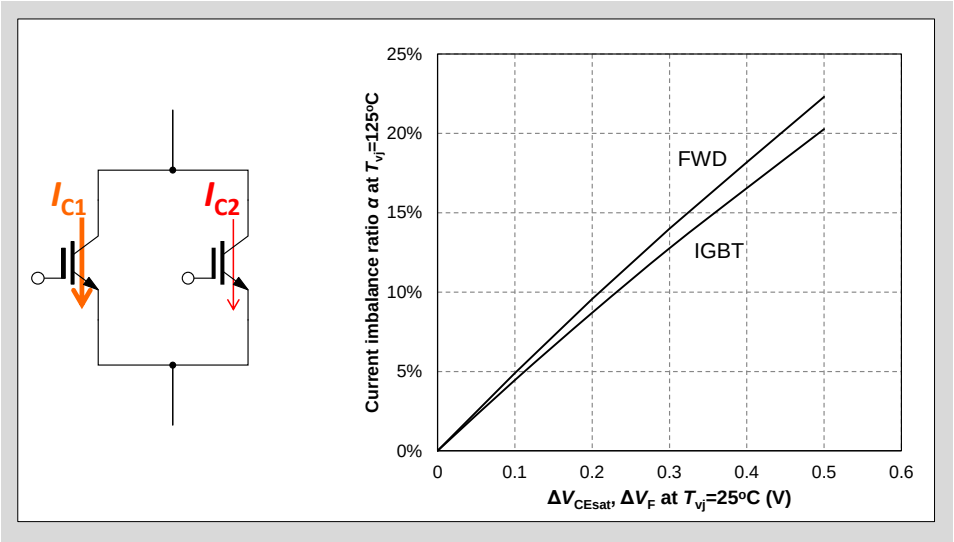


図 2-12 $V_{CE(sat)}$, V_F のバラつきと電流アンバランス率（1200V）

$$\alpha = \left(\frac{I_{C1}}{I_{C(ave)}} - 1 \right) \times 100 \quad \cdots\cdots \text{式 2-1}$$

5. マウンティングインストラクション

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

富士電機パワー半導体 デザインサポート
http://www.fujielectric.co.jp/products/semiconductor/technical/

© Fuji Electric Co., Ltd. All rights reserved.