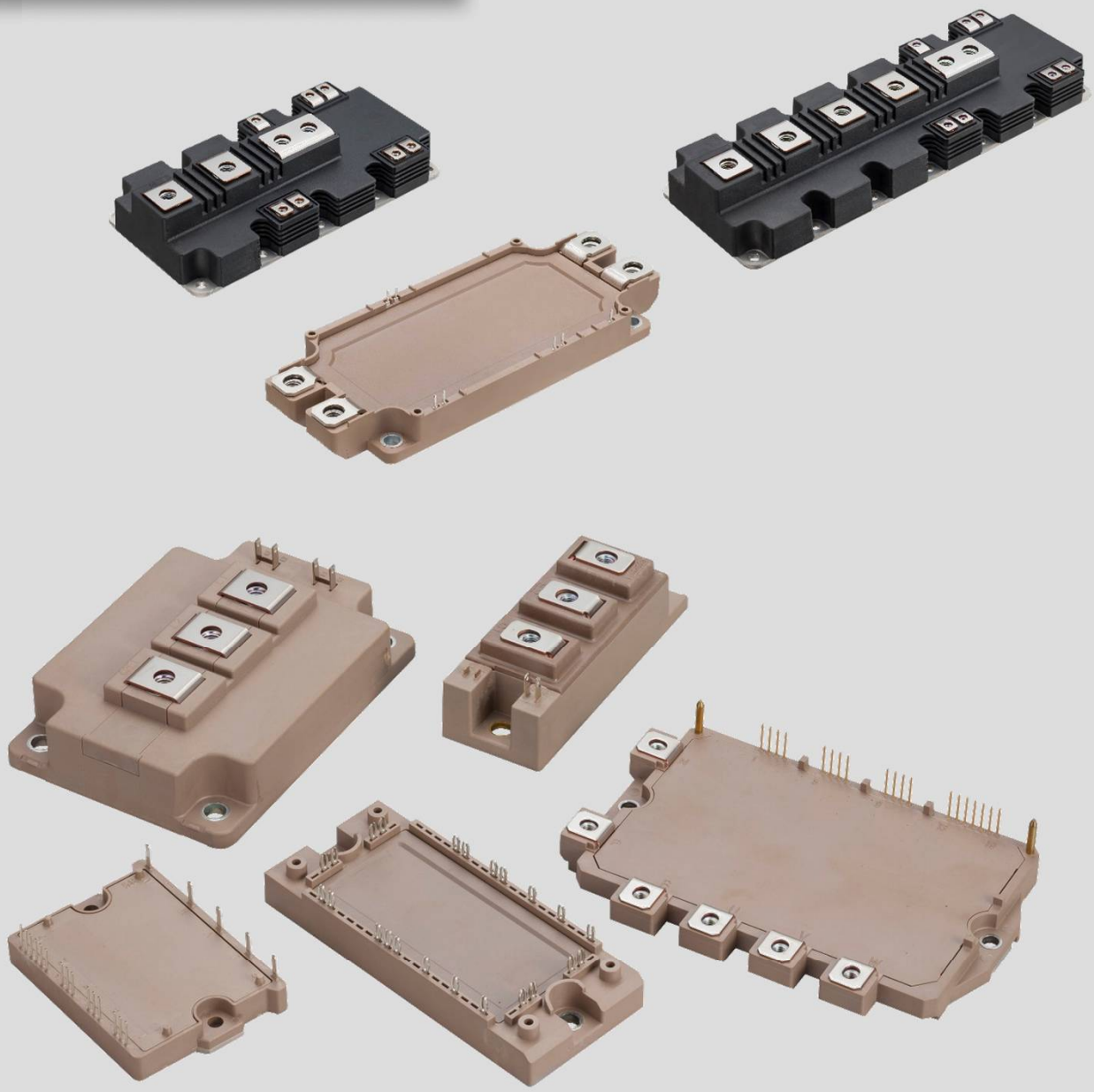
Fuji Electric
Innovating Energy Technology



富士 IGBT モジュール
第2章　用語と特性

Application Manual

Dec., 2020 Rev.f

Fuji Electric Co., Ltd.

RH984f

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

注意

このマニュアルの内容（製品の仕様、特性、データ、材料、構造など）は2020 年12 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。
このマニュアル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。

本資料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、
本資料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。

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

⚠注意

(1) 輸送と保管

段ボール箱の適切な面を上にして運搬してください。そうしないと製品に予期しないストレスがかかり、端子の曲りや樹脂パッケージ内の歪みなど、影響を及ぼす可能性があります。さらに製品を投げたり落下させたりすると、製品に大きなダメージを与える可能性があります。また水に濡れると破壊や故障の原因になりますので、雨や凍結には十分な配慮をお願いします。輸送中の温度や湿度などの環境条件は、仕様書に記載してありますので厳守してください。

(2) 組み立て環境

パワーモジュールの素子は静電気放電に対して非常に弱いため、組み立て環境におけるESD 対策を、仕様書に記載の範囲内で適切に実施してください。特に、導電性スポンジを制御端子から取り外す時が、最も製品に電気的ダメージを与える可能性があります。

(3) 動作環境

製品を酸や有機物、腐食性ガス(硫化水素、硫酸ガスなど)にさらされる環境で使用した場合、製品性能や外観を十分確保することができません。

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

第2章　用語と特性

1. 用語説明 2-2
2. IGBTモジュールの特性 2-4

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

本章では、IGBTモジュールに関する用語および特性について説明します。

1. 用語説明

以下に、仕様書等に使用している様々な用語について説明します。

表2-1 最大定格(Maximum Ratings)

用 語	記 号	定義 及び 説明 (条件は各製品の仕様書を参照ください。)
コレクターエミッタ間電圧 (Collector-Emitter voltage)	V_{CES}	ゲートーエミッタ間を短絡した状態でコレクターエミッタ間に印加できる最大電圧
ゲートーエミッタ間電圧 (Gate-Emitter voltage)	V_{GES}	コレクターエミッタ間を短絡した状態でゲートーエミッタ間に印加できる最大電圧
コレクタ電流 (Collector current)	I_C	IGBTに流すことができる最大直流電流
	I_{C}pulse	IGBTに流すことができる最大パルス電流
	$-I_C$	FWDに流すことができる最大直流順電流
	$-I_C$ pulse	FWDに流すことができる最大パルス順電流
最大損失 (Collector power dissipation)	P_C	1アーム当りのIGBTで許容する最大電力損失
接合部温度 (Vertual junction temperature)	T_{vj}	素子が異常を引き起こさず動作できる接合部の最大温度 (装置の最悪条件下にて、この値を超えない設計が必要)
連続動作時接合部温度 (Operating vertual junction temperature)	$T_{vj(op)}$	素子を連続的に動作させることが可能な接合部の温度
ケース温度 (Case temperature)	T_C	モジュールのケース温度 (IGBTあるいはFWD直下の銅ベース下面温度を示す。詳細は第6章を参照)
保存温度 (Storage temperature)	T_{stg}	モジュールに電気的負荷をかけずに保存、または輸送できる温度範囲
電流二乗時間積 (FWDーI2T)	I^2t	ダイオードが許容する過電流のジュール積分値。 商用正弦半波(50,60Hz), 1サイクルで規定する
尖頭サージ順電流 (FWDーIFSM)	I_{FSM}	ダイオードが許容する1サイクルの商用正弦半波(50,60Hz)電流ピーク値
絶縁耐圧 (Isolation voltage)	V_{iso}	モジュールの電極全てを短絡した状態で、電極と冷却体取付面間で許容する 正弦波電圧実効値の最大値
締付けトルク (Screw torque)	Mounting	所定のネジで素子と冷却体(ヒートシンク)を締付ける際の最大許容トルク値
	Terminal	所定のネジで端子と外部電極を締付ける際の最大許容トルク値

注1:特に規定のない限りT_C=25℃の値を記載しています。

注:最大定格として記載されている値は、いかなる場合もこれを超えてはなりません。

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

表2-2. 電気的特性(Electrical Characteristics)

用語		記号	定義及び説明 (条件は各製品の仕様書を参照ください。)
静特性	コレクターエミッタ間遮断電流 (Zero gate voltage Collector current)	I_{CES}	ゲート(以下G)－エミッタ(以下E)間を短絡した状態で、 コレクタ(以下C)－E間に指定電圧を印加したときのC-E間の漏れ電流
	ゲートーエミッタ間漏れ電流 (Gate-Emitter leakage current)	I_{GES}	C－E間を短絡した状態で、G－E間に指定電圧を印加したときの G-E間の漏れ電流
	ゲートーエミッタ間しきい値電圧 (Gate-Emitter threshold voltage)	$V_{GE(th)}$	指定C-E間電流(以下コレクタ電流)とC-E間電圧(以下V_{CE})における G－E間電圧(以下V_{GE})
	コレクターエミッタ間飽和電圧 (Collector-Emitter saturation voltage)	$V_{CE(sat)}$	指定のVGEにおいて定格コレクタ電流を流した時のVCE値
	入力容量 (Input capacitance)	C_{ies}	C-E間を交流的に短絡した状態で、G-E間およびC-E間に指定電圧を 印加した時のG-E間容量
	出力容量 (Output capacitance)	C_{oes}	G-E間を交流的に短絡した状態で、G-E間およびC-E間に指定電圧を 印加した時のC-E間容量
	帰還容量 (Reverse transfer capacitance)	C_{res}	E接地で、C-E間およびG-E間に指定電圧を印加した時のC-G間容量
	ダイオード順電圧 (Forward on voltage)	V_F	FWDに指定の順方向電流(通常定格電流)を流したときの順方向電圧値
動特性 詳細は図2-5を参照ください)	ターンオン時間 (Turn-on time)	t_{on}	IGBTのターンオン時V_{GE}が0Vに上昇後、V_{CE}が最大値の10%に 下降するまでの時間
	立上り時間 (Rise time)	t_r	IGBTのターンオン時コレクタ電流が設定値の10%に上昇した時点から、 V_{CE}が設定値の10%に下降するまでの時間
		$t_{r(i)}$	IGBTのターンオン時コレクタ電流が設定値の10%に上昇した時点から、 90%に到達するまでの時間
	ターンオフ時間 (Turn-off time)	t_{off}	IGBTのターンオフ時V_{GE}が設定値の90%に下降した時点から、 コレクタ電流が下降する電流の接線上で設定値の10%に下降するまでの時間
	立下り時間 (Fall time)	t_f	IGBTのターンオフ時コレクタ電流が設定値の90%から、 下降する電流の接線上で設定値の10%に下降するまでの時間
	逆回復時間 (Reverse recovery time)	t_{rr}	FWDの逆回復電流が消滅するまでに要する時間
	逆回復電流 (Reverse recovery current)	I_{rr} (I_{rp})	FWDの順方向電流遮断時に逆方向に流れる電流のピーク値
逆バイアス安全動作領域 (Reverse Bias Safe Operation Area)		RBSOA	ターンオフ時に指定の条件にてIGBTを安全に遮断できる コレクタ電流とV_{CE}の領域
ゲート抵抗 (Gate resistance)		r_g	モジュールに内蔵するゲート直列抵抗値
ゲート電荷量 (Gate charge capacity)		Q_G	IGBTをターンオンさせるためにG-E間に充電する電荷量

表2-3. 熱的特性(Thermal Characteristics)

用語	記号	定義及び説明 (条件は各製品の仕様書を参照ください。)
熱抵抗 (Thermal resistance)	$R_{th(j-c)}$	IGBTあるいはFWDのチップ·ケース間熱抵抗
	$R_{th(c-s)}$	IGBTモジュールをサーマルグリースを用いて推奨トルク値にてヒートシンクに 取付けた状態でのケースー冷却体間熱抵抗

表2-3. サーミスタ特性(Thermistor Characteristics)

用語	記号	定義及び説明 (条件は各製品の仕様書を参照ください。)
サーミスタ抵抗 (Resistance)	Resistance	指定温度でのサーミスタ端子間電気抵抗値
B値 (B value)	B	抵抗－温度特性において、任意の２温度間での抵抗変化の 大きさを表す定数

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

2. IGBTモジュールの特性

6MBI100VB-120-50（1200V/100A,第6世代IGBTモジュール）を例に取り、仕様書等に記載しているIGBTの種々の特性についての説明を以下に示します。

2.1 静特性

VシリーズIGBT：6MBI100VB-120を例にV_{CE}－I_C特性(一般的に出力特性と呼ばれる)のV_{GE}依存性を図2-1, 図2-2に示します。この特性はIGBTがオンしている時のドロップ電圧(V_{CE})と電流(I_C)の関係を示すもので、オン時にIGBTに発生する損失となります。従ってV_{CE}が低い程、発生損失が小さくなりますが、この特性は温度(T_{vj}), V_{GE}によって変化しますので、これらの特性をよく考慮した上で装置設計を行なうようお願いします。

一般的にはV_{GE}＝15Vにおいて、装置の最大出力電流≦素子のI_C定格電流値以下で使用することを推奨いたします。

尚、図2-3は図2-1のデータをV_{CE} - V_{GE}特性のI_C依存性に置き換えたグラフで、V_{CE}が急激に増える限界のV_{GE}の目安を読み取ることが出来ます。

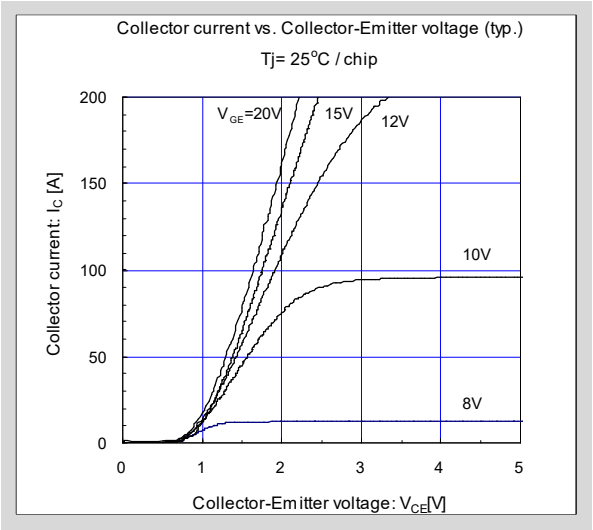


図2-1　$V_{CE(sat)}$－I_C特性（T_{vj}=25℃）

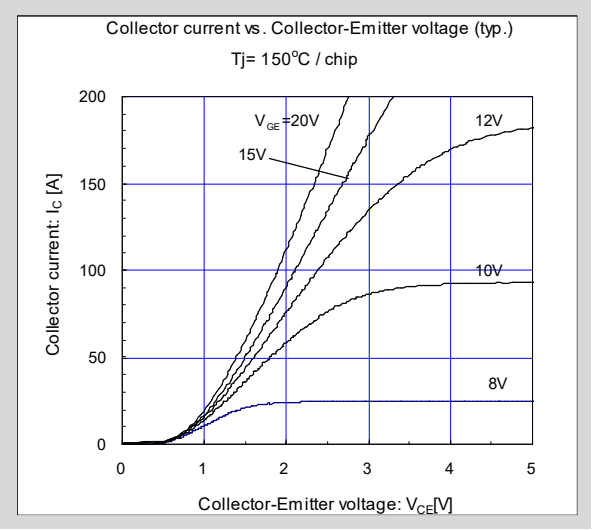


図2-2　$V_{CE(sat)}$－I_C特性（T_{vj}=150℃）

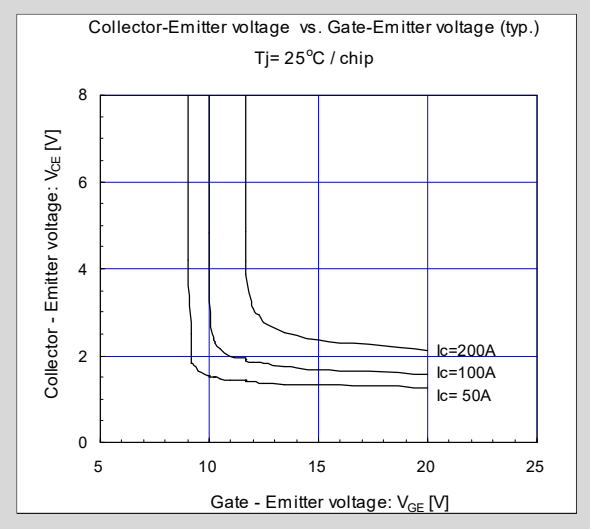


図2-3　V_{CE}－V_{GE}特性（T_{vj}=25℃）

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

2.2 スイッチング特性

IGBTは一般的にスイッチング用途に使用するため、ターンオン，ターンオフする時のスイッチング特性を十分に理解しておくことが重要です。またこの特性は種々のパラメータによって変化するため、これらも考慮に入れて装置の設計を行なう事が必要です。

このスイッチング特性は、スイッチング時間とスイッチング損失の二つに大別することができます。これらのスイッチング特性は図2-4に示すチョッパ回路で測定する事が出来ます。

表2-2(動特性項目)に記載したスイッチング時間t_{on}，t_r，$t_{r(i)}$，t_{off}，t_f，t_{rr}，I_{rr} 7項目の定義を図2-5の概略波形で示します。

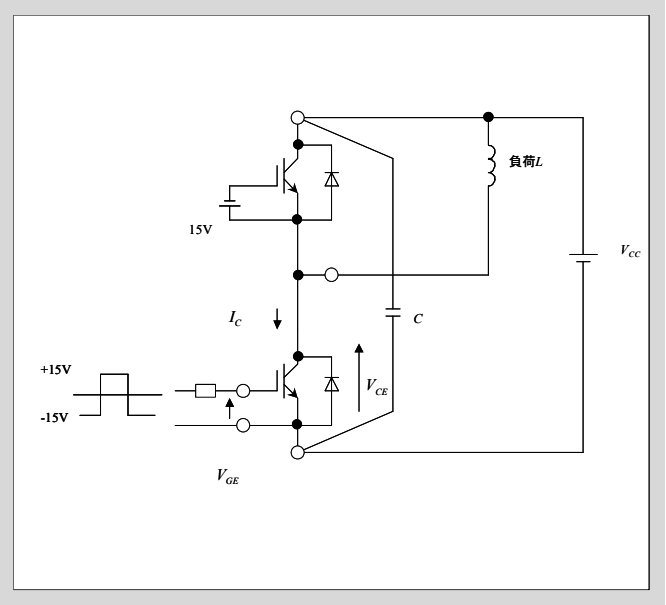


図2-4　スイッチング特性測定回路

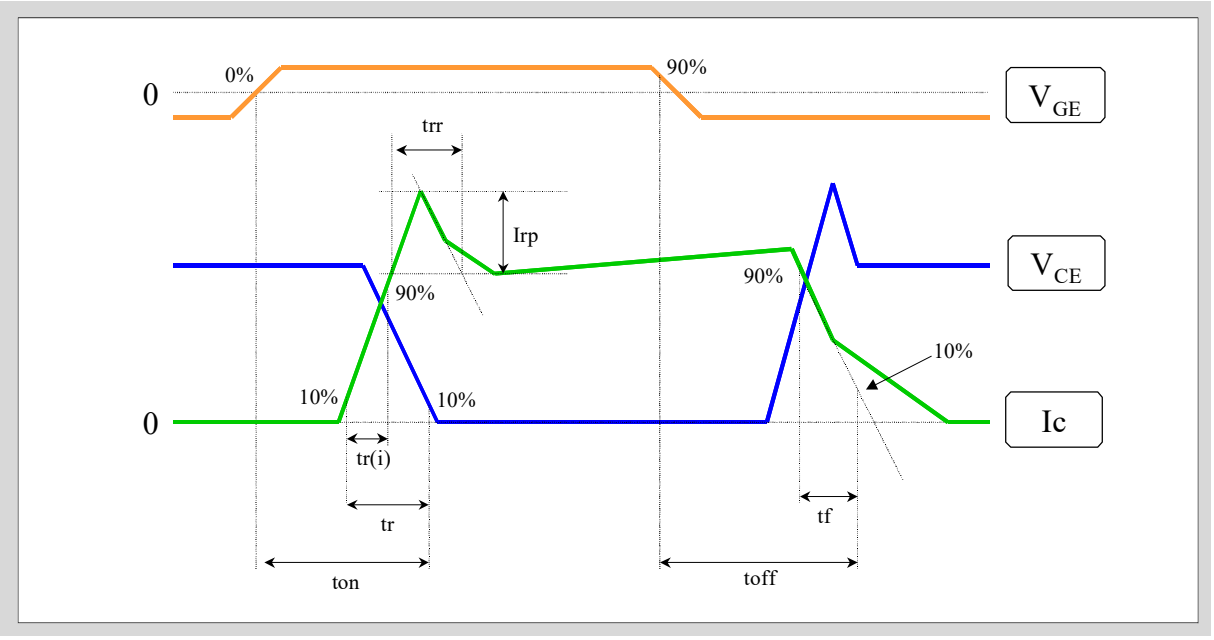


図2-5　スイッチング時間の定義

これらのスイッチング時間とコレクタ電流の関係を図2-6，7，16に、スイッチング時間とゲート抵抗の関係を図2-8に示します。この様にスイッチング時間はコレクタ電流,温度(T_{vj}),ゲート抵抗R_Gによって変化しますので装置設計の際、充分な考慮をお願いします。例えばスイッチング時間(特にt_{off})が長くなる条件(R_Gが大きい等)で使用しますと、デッドタイム不足による直列アーム短絡（片方のIGBTがオフする前にもう片方のIGBTがオンして過大な電流が流れる現象、詳しくは第4章を参照ください）等の不具合を起こし素子が破壊する可能性

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

があります。一方t_fが短すぎる条件(R_Gが小さすぎる等が原因)で使用しますと過渡的な電流変化(dI_C/dt)が大きくなりますので、これにより回路のインダクタンス(Ls)によるスパイク電圧(=Ls×dIc/dt)が発生します。このスパイク電圧が印加電圧に上乗せされるため、RBSOA(本章2.4を参照ください)を超えて素子が破壊する場合もあります。したがって装置設計時、コレクタ電流,温度(T_{vj}),ゲート抵抗R_G などを充分に考慮し、上記不具合が発生しないように設計してください。

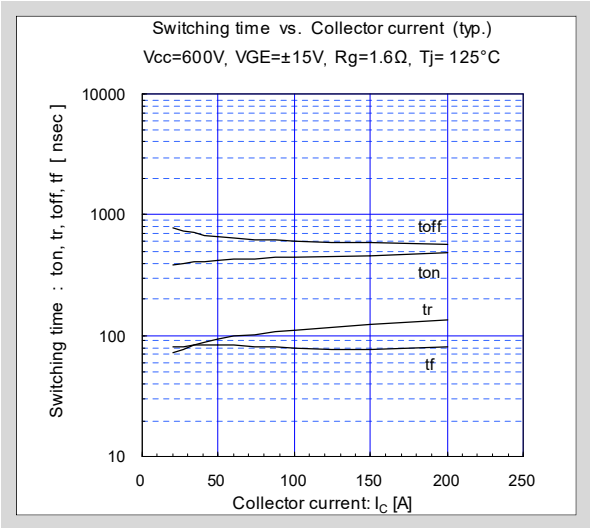


図2-6　スイッチングタイム－I_C特性(T_{vj}=125℃)

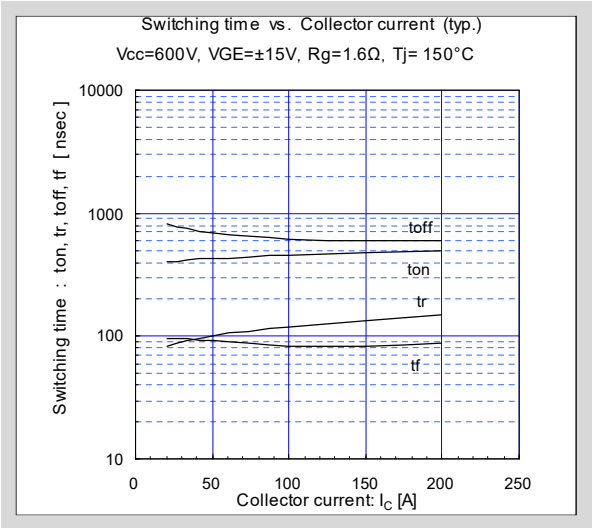


図2-7　スイッチングタイム－I_C特性(T_{vj}=150℃)

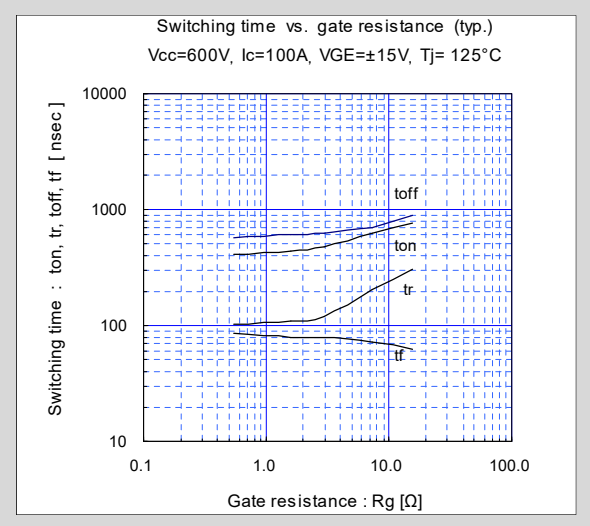


図2-8　スイッチングタイム－R_G特性(T_{vj}=125℃)

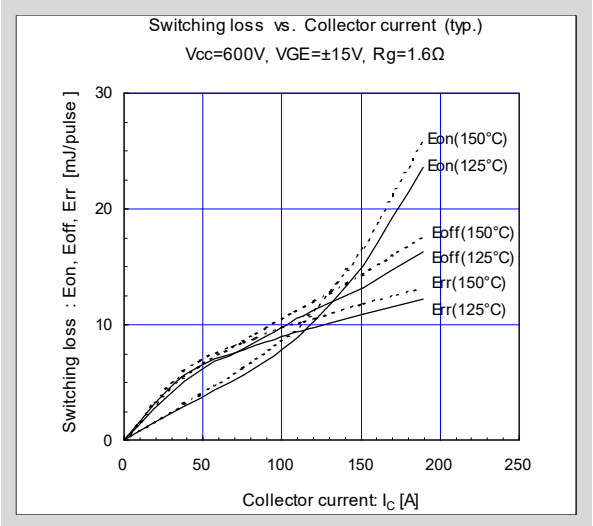


図2-9　スイッチング損失－I_C特性

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

一方スイッチング損失（E_{on}，E_{off}，E_{rr}）は、IGBTがスイッチングする際(ターンオン,オフ時)に発生します。この特性は図2-9,10に示す様に温度（T_{vj}），I_C，R_Gで変化します。特にR_Gの選定は重要で、大きすぎるとスイッチング損失が大きくなる上、前述のデッドタイム不足による直列アーム短絡を起こしやすくなります。逆にスイッチング損失を下げるためにR_Gを小さくする場合は、前述の急激なスパイク電圧（=Ls×di_C/dt）が発生するという問題を起こす可能性があります。ここから分かるように、R_G選定においては主回路インダクタンス(Ls)の値が非常に重要です。この値が低ければ低い程、R_G選定の検討が容易（R_Gが小さくてもスパイク電圧が出にくい）になりますので、このLsの値を出来るだけ小さく設計する事を推奨します。尚、R_Gの決定にはIGBT駆動回路の容量とのマッチングも考慮する必要がありますので、本章2.3の容量特性を使用して十分に検討を行った上でR_Gの選定をお願いします。

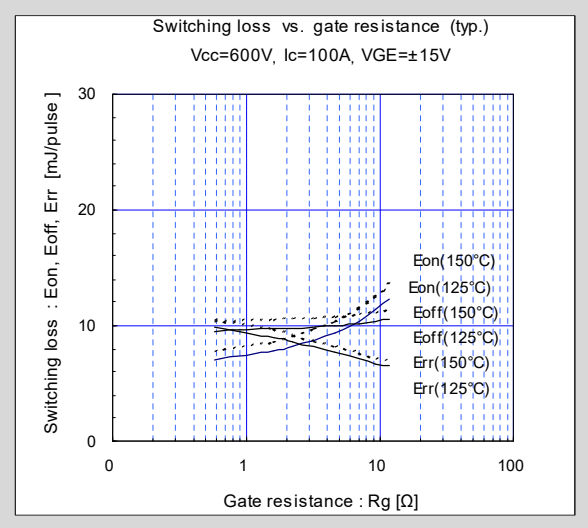


図2-10　スイッチング損失－R_G特性

2.3 容量特性

図2-11にゲートチャージ（Q_G）の特性を示します。この特性は、ゲートチャージ容量(Q_G)に対するC-E間電圧（V_{CE}），G－E間電圧（V_{GE}）の変化を示しています。「Q_Gが増加する」ことは「IGBTのG-E間の容量に電荷を充電する」ことを表すため、Q_Gが増加するとV_{GE}(= Q_G ／G-E間容量)が上昇しIGBTがオンします。IGBTがオンするとV_{CE}がオン電圧まで下降します。このようにゲートチャージ容量Q_GはIGBTを駆動するために必要な電荷量を示しています。この特性は駆動回路の電源容量を決定する際にご利用ください。図2-12にIGBTの各接合容量の特性を示します。これらは図2-13に示す様にC_{ies}はG－E間の入力容量，C_{oes}はC－E間の出力容量，C_{res}はC－G間の帰還容量です。これらの特性はQ_Gと共に駆動回路設計の際にご使用ください。

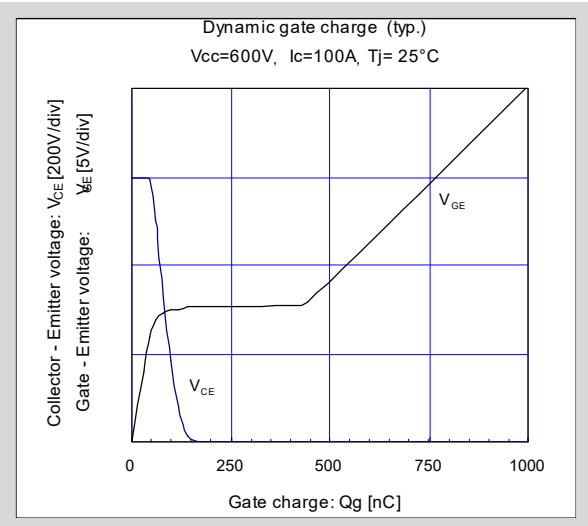


図2-11　V_{CE}, V_{GE}－Q_G特性

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

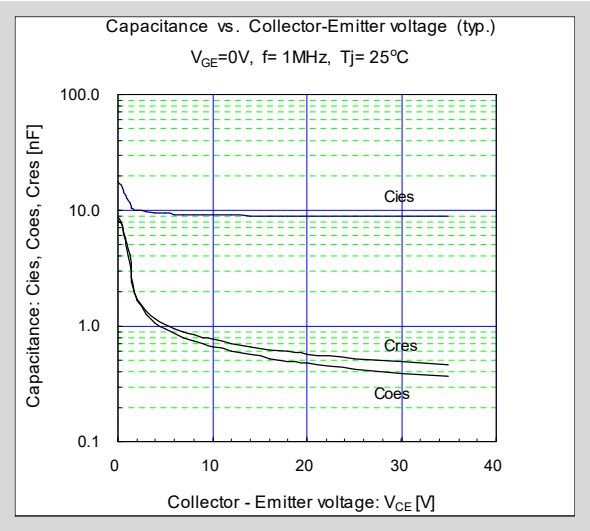


図2-12　接合容量－V_{CE}特性

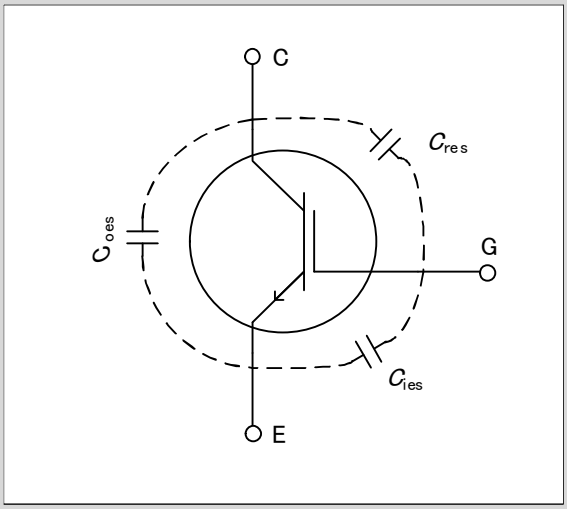


図2-13　接合容量

2.4 逆バイアス安全動作領域RBSOA

IGBTをターンオフさせる際、安全に遮断できるV_{CE}－I_Cの動作範囲を逆バイアス安全動作領域RBSOA（Reverse Bias Safe Operating Area）と言い1200V/100A/IGBTモジュールの場合、図2-14に示す範囲となります。

ターンオフ時V_{CE}－I_Cの動作軌跡がこのRBSOAの領域に納まるようにスナバ回路設計をする必要があります。

なお、短絡電流遮断時の安全動作領域SCSOA（Short Circuit Safe Operating Area)については、シリーズごとに異なりますので、そのシリーズのテクニカルデータを参照願います。

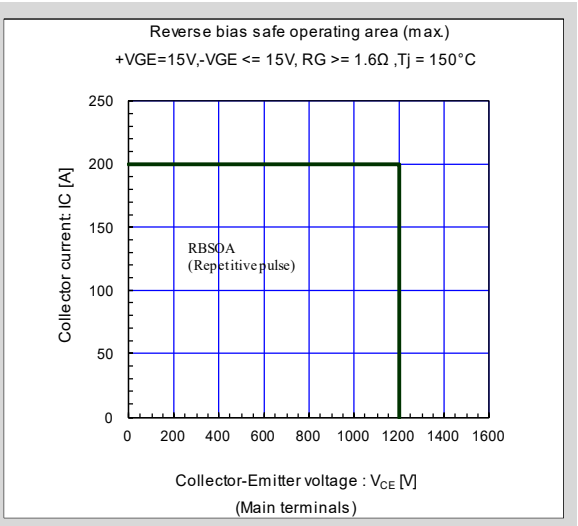


図2-14　逆バイアス安全動作領域(RBSOA)

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

2.5 内蔵ダイオード(FWD)の特性

IGBTモジュールでは、高速ダイオード(以下、FWD:Free Wheeling Diode)をIGBTと逆並列に接続し、モジュールに内蔵しています。このFWDは図2-15に示すV_F－I_F特性と図2-16に示す逆回復特性(t_{rr}, I_{rr})、および図2-9,10に示す逆回復動作時のスイッチング損失(E_{rr})特性を有しています。これらの特性はIGBTと同様FWDに発生する損失計算に使用します。またFWDの特性はコレクタ電流, 温度(T_{vj}), R_Gなどにより変化するので注意が必要です。

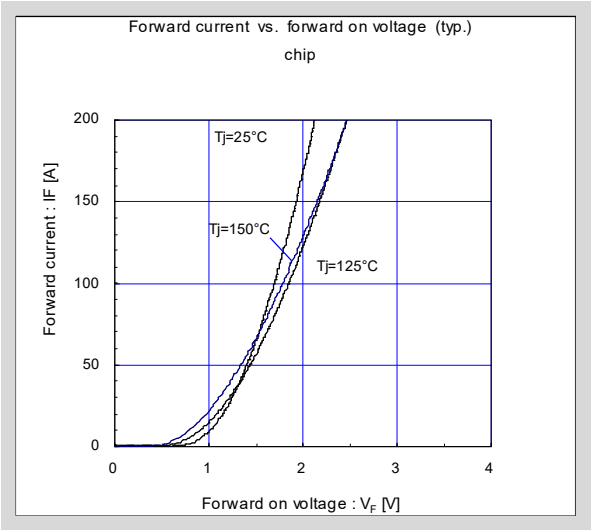


図2-15 V_F－I_F特性

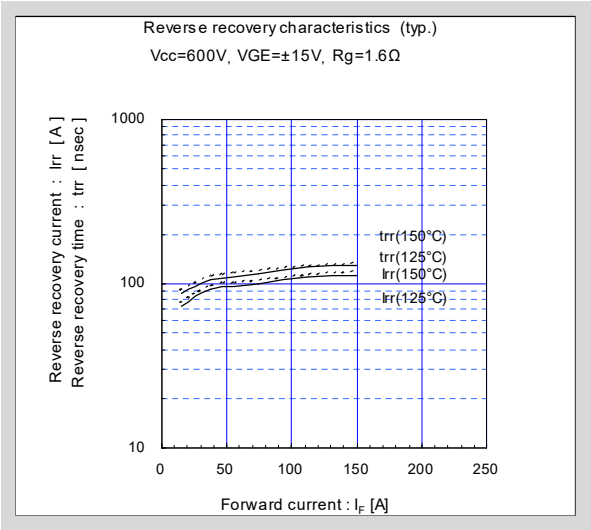


図2-16 t_{rr}, I_{rr}－I_F特性

2.6 過渡熱抵抗特性

温度上昇の計算及びヒートシンクの設計に用いる過渡熱抵抗特性を図2-17に示します(この特性はIGBT,FWD共に1アーム当りの特性です)。

この熱抵抗とは熱解析等でよく使われる特性で電気抵抗のオームの法則に酷似した公式:
「温度差 Δ T[℃]＝ 熱抵抗R_{th}[℃/W]×エネルギーE(損失)[W] 」で定義されます。

IGBTモジュールでは熱抵抗はIGBT,FWDのT_{vj}を計算する際に使用します。
(詳細は第6章「放熱設計方法」をご参照ください)

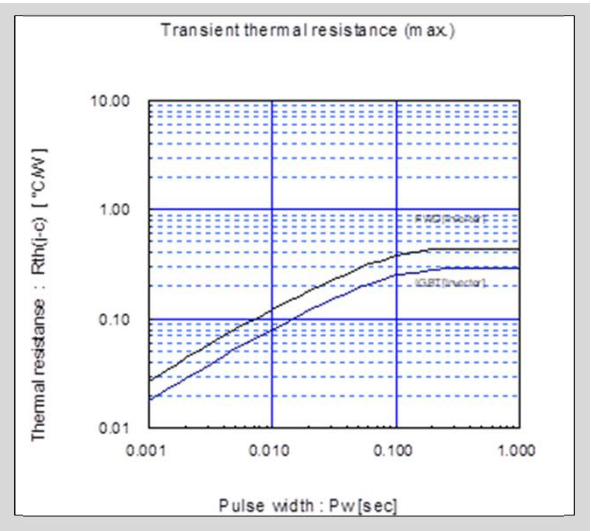


図2-17 過渡熱抵抗特性

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