

ディスクリットIGBT

Application Manual

注意

1. この資料の内容(製品の仕様、特性、データ、材料、構造など)は2025年12月現在のもので、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。この資料に記載されている製品を使用する場合には、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。
2. 本資料に記載してある応用例は富士電機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。
3. 富士電機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、半導体製品は故障が発生したり、誤動作する場合があります。富士電機製半導体製品の故障または誤動作が、結果として人身事故、火災等による財産に対する損害や、社会的な損害を起こさないように冗長設計、延焼防止設計、誤動作防止設計などの安全確保をお客様の責任において行ってください。
4. 本資料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
5. 本仕様書に記載されている製品は、人命に関わるような状況下で使用される機器あるいはシステムに用いられる事を目的として設計・製造されたものではありません。以下に示す機器あるいはシステムへの適用に関し、富士電機は一切の責任を負いません。
 - ・幹線用通信機器・交通信号機・医療機器
 - ・ガス警報器および遮断機・防災/防犯装置・安全確保のための各種装置
6. 極めて高い信頼度を要求される下記のような機器および戦略物資に該当する機器には、本仕様書に記載の製品を使用しないでください。
 - ・車両機器(自動車、鉄道、船舶など)・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
7. 本資料の一部または全部の転載複製については、文書による弊社の承諾が必要です。
8. 本資料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。

第6章 放熱設計方法

1. ディスクリートIGBTの発生損失	6-2
2. Fuji IGBTシミュレータについて	6-3
3. 昇圧チョッパ回路の発生損失計算方法	6-4
4. 三相2レベルインバータ回路の発生損失計算方法	6-5
5. 放熱の考え方	6-9

1. ディスクリートIGBTの発生損失

ディスクリートIGBTはIGBTのみの製品とIGBT+FWD構成の製品があります。後者の発生損失はIGBTとFWDの2つの発生損失を考慮する必要があります。また発生する損失は図6-1に示すように定常時の導通損失とスイッチング時のスイッチング損失があります。以上を整理すると図6-2のようになります。

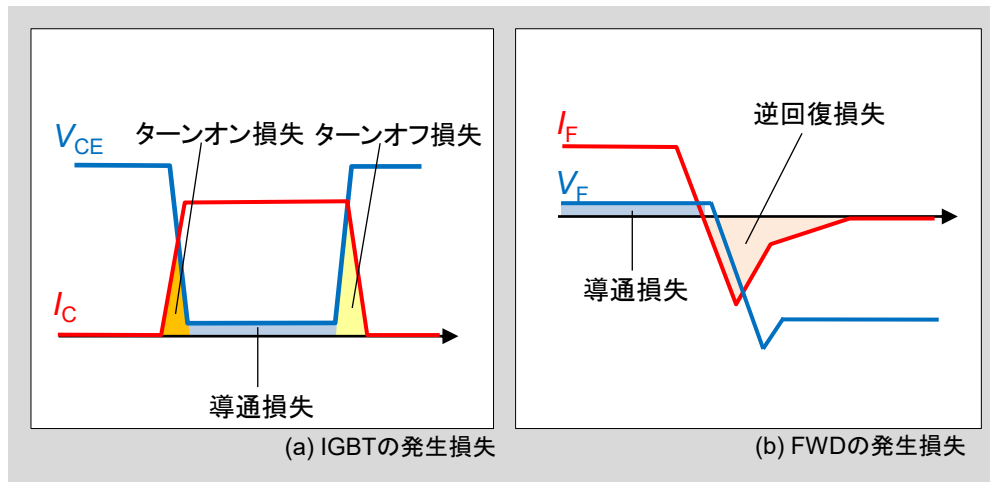


図6-1 IGBTとFWDのスイッチング波形と発生損失

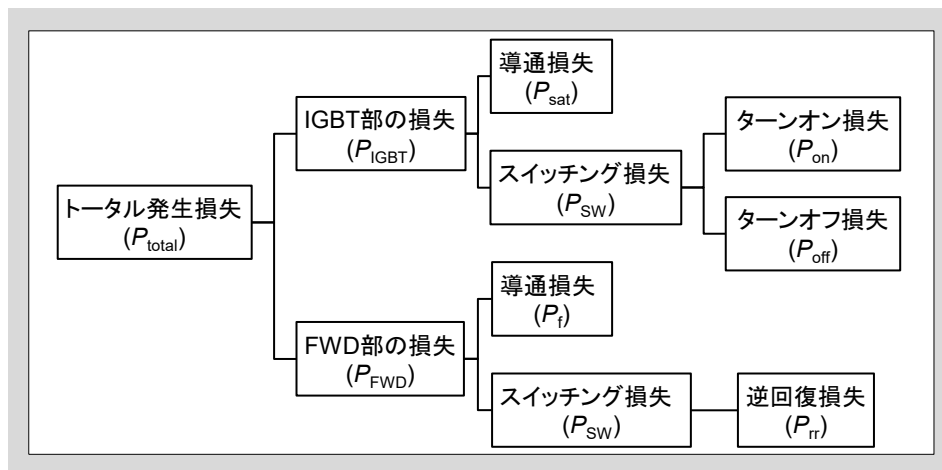


図6-2 ディスクリートIGBT発生損失の分類

IGBT部の導通損失はデータシートに記載のオン電圧-コレクタ電流特性($V_{CE(sat)}$ - I_C 特性)から、FWD部の導通損失はオン電圧-順方向電流特性(V_F - I_F 特性)から計算します。また、各スイッチング損失はスイッチングエネルギー-コレクタ電流/順方向電流特性(E_{on} - I_C 、 E_{off} - I_C 、 E_{rr} - I_C 特性)から計算します。これらの発生損失から放熱設計を行い、素子の接合部温度 T_{vj} が定格を超えないようにします。なお、ここで使用するオン電圧やスイッチング損失の値には、 T_{vj} が高温時のデータを使用して計算してください。

2. Fuji IGBTシミュレータについて

ウェブサイトでは、ディスクリートIGBTの発生損失や接合部温度を計算するツールとしてFuji IGBTシミュレータ*を公開しています。Fuji IGBTシミュレータでは、データシートの特性カーブをより精度よく近似し、また素子接合部温度依存性も考慮した計算を行うことができます。使用方法については、ウェブサイトに掲載のユーザマニュアルをご参照ください。

しかし、製品や回路によってはFuji IGBTシミュレータで計算を行うことができない場合があります。その際は、損失を手計算で行う必要があります。次項以降で発生損失の計算方法について述べますので、内容を参考にして計算を行ってください。

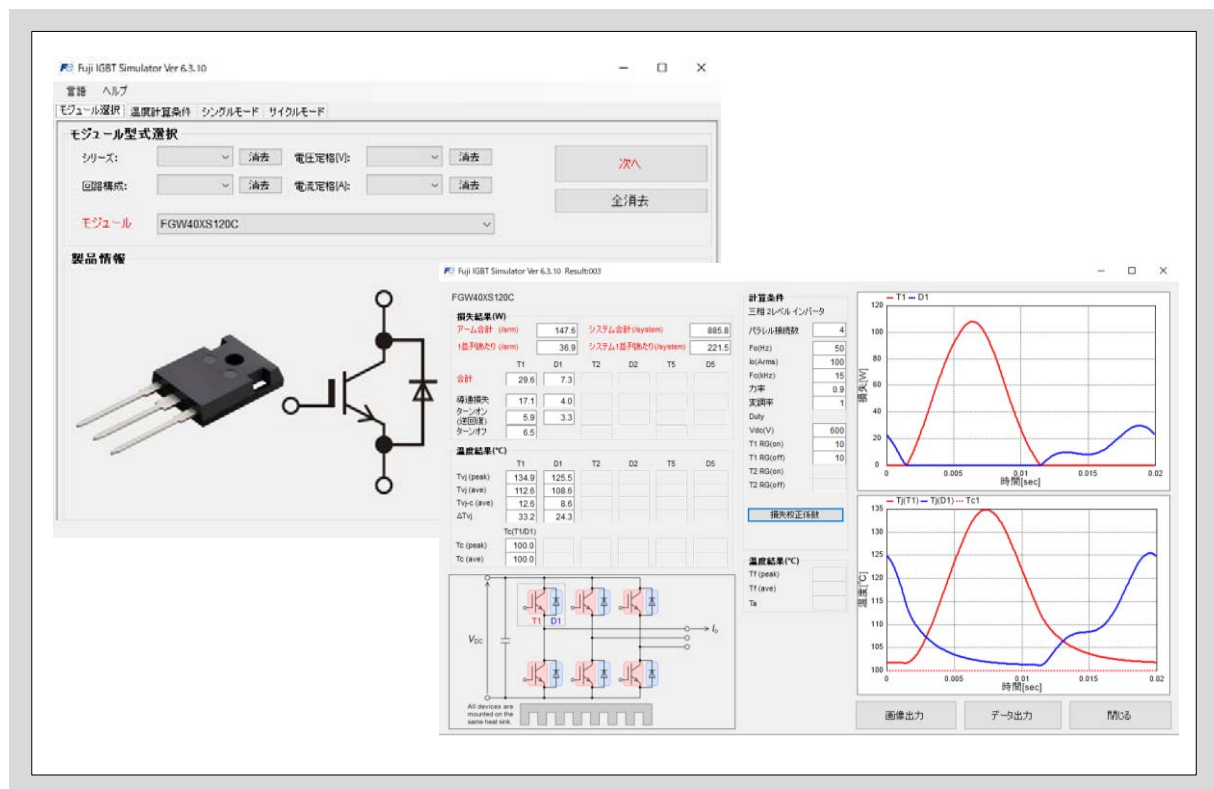


図6-3 Fuji IGBT シミュレータの使用例

* Fuji IGBTシミュレータ: www.fujielectric.co.jp/products/semiconductor/model/power_modules/igbt/simulation/

3. 昇圧チョップパ回路の発生損失計算方法

図6-4に示すような昇圧チョップパ回路の場合、IGBT(T_1)およびFWD(D_1)に流れる電流を矩形波の連続と考えれば、 T_1 、 D_1 の単位時間当たりの発生損失(単位:W)は以下の式で近似計算することができます。

$$P_{\text{IGBT}} = \text{導通損失} + \text{ターンオン損失} + \text{ターンオフ損失}$$

$$= V_{\text{CE(sat)}} \cdot I_C \cdot d + (E_{\text{on}} + E_{\text{off}}) \cdot f_c \cdot \left(\frac{V_{\text{CC}}}{V_{\text{CC0}}}\right)^\alpha \quad \text{-----(1)}$$

$$P_{\text{FWD}} = \text{導通損失} + \text{逆回復損失}$$

$$= V_F \cdot I_F \cdot (1 - d) + E_{\text{rr}} \cdot f_c \cdot \left(\frac{V_{\text{CC}}}{V_{\text{CC0}}}\right)^\alpha \quad \text{-----(2)}$$

ただし、

- d : IGBTのオンデューティ = t_1 / t_2
- f_c : キャリア周波数(スイッチング周波数) = $1 / t_2$
- V_{CC} : 電源電圧
- V_{CC0} : データシートに記載しているスイッチング電圧
- α : スwitchングエネルギーのスイッチング電圧依存性係数

スイッチングエネルギーがスイッチング電圧に比例するとみなせば、 $\alpha = 1$ とすることができます。

一方 $V_{\text{CE(sat)}}$ 、 V_F 、 E_{on} 、 E_{off} 、 E_{rr} の値は素子の T_{vj} に依存し、 E_{on} 、 E_{off} 、 E_{rr} の値はゲート抵抗値 R_G によっても変化しますので、データシートのグラフを参考に換算を行ってください。

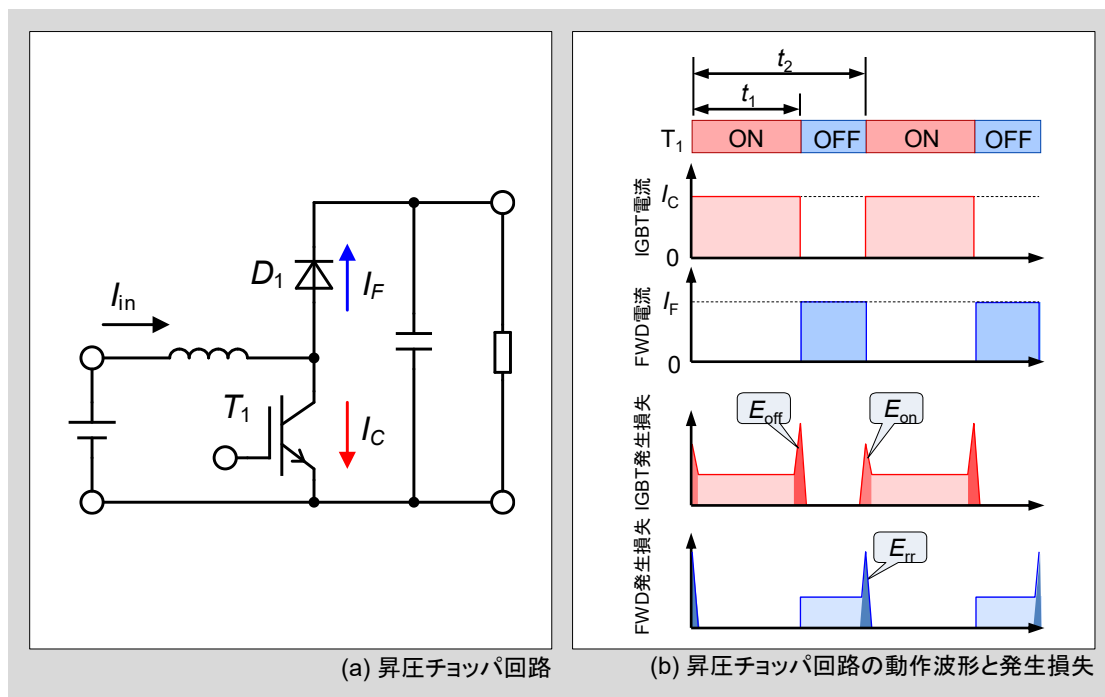


図6-4 昇圧チョップパ回路での発生損失

4. 三相2レベルインバータ回路の発生損失計算方法

三相2レベル電圧型インバータでPWM制御を行う場合の損失計算は図6-5に示すようにIGBTやFWDに流れる電流値や動作条件が常に変化しているため、発生損失を正確に計算するには複雑な計算が必要になります。ここではディスクリートIGBTの特性カーブ近似式を用いてインバータ回路でのIGBT/FWDの発生損失を簡易的に計算する方法を紹介します。

計算を行うにあたり、以下の条件を前提とします。

- ・ PWM 制御三相 2 レベルインバータであること
- ・ PWM は三角波比較の正弦波変調方式であること
- ・ 出力電流は理想的な正弦波であること

インバータの出力相電流の実効値を I_o とすると正弦波の電流波形は以下の式で表されます。

$$i_o(\theta) = \sqrt{2} \cdot I_o \cdot \sin \theta \quad \text{.....(3)}$$

またIGBTのオンデューティ波形 $d(\theta)$ は、変調率を m 、電流の遅れ力率を $\cos\phi$ とすると以下の式で表されます。

$$d(\theta) = \frac{1 + m \cdot \sin(\theta + \phi)}{2} \quad \text{.....(4)}$$

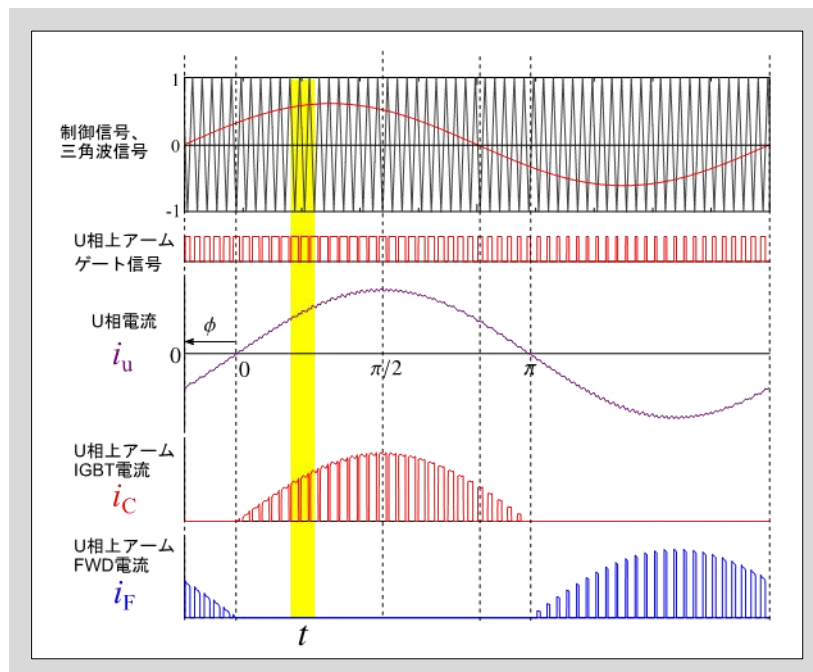


図6-5 正弦波変調2レベルインバータの動作波形

IGBTに I_C が流れると、コレクタ-エミッタ間に $V_{CE(sat)}$ が発生します。 $V_{CE(sat)}$ は I_C に依存し、その依存性グラフはデータシートに記載されています。インバータにおけるIGBTの導通損失を計算するために、この $V_{CE(sat)}$ の I_C 依存性を図6-6で示すように直線近似した場合、以下の式で表されます。

$$V_{CE(sat)} = r_C \cdot I_C + V_{CEO} \quad \text{-----}(5)$$

同様に、FWDのオン電圧 V_F の順電流 I_F 依存性も直線近似した場合、以下の式で表されます。

$$V_F = r_F \cdot I_F + V_{FO} \quad \text{-----}(6)$$

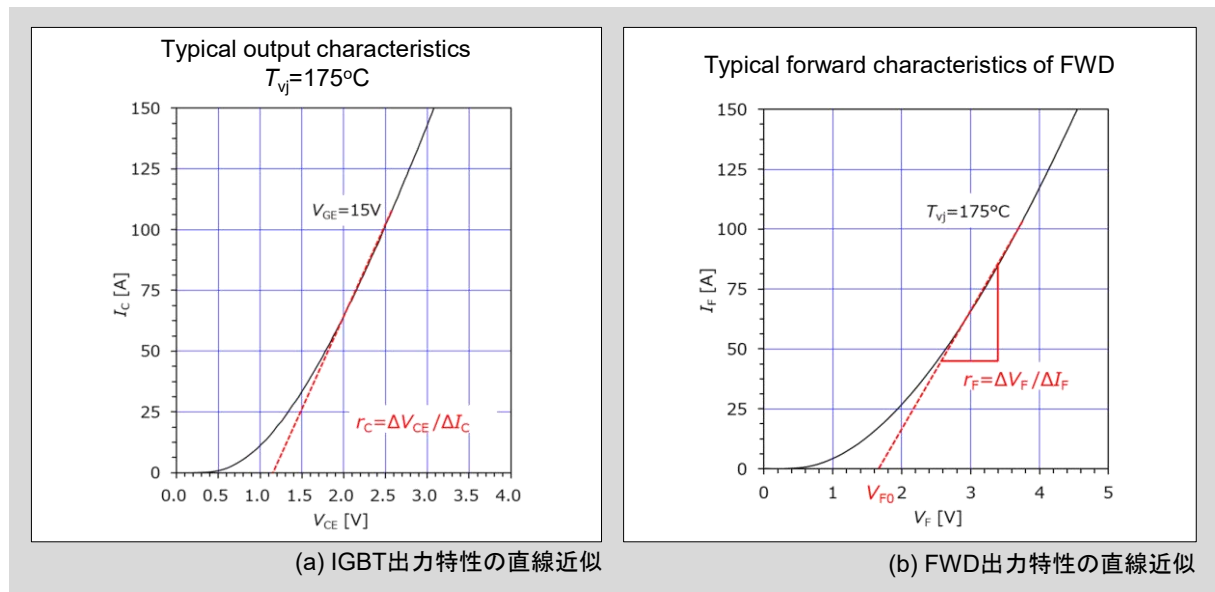


図6-6 出力特性の近似

(3)式、(4)式および(5)式より、インバータ回路での1アームあたりのIGBTの導通損失 P_{sat} は、

$$\begin{aligned} P_{sat} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \{i_O(\theta) \cdot V_{CEsat}(\theta) \cdot d(\theta)\} d\theta \\ &= 2I_O^2 \cdot r_C \left(\frac{1}{8} + \frac{m}{3\pi} \cos \varphi \right) + \sqrt{2} \cdot I_O \cdot V_{CEO} \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m}{8} \cos \varphi \right) \quad \text{-----}(7) \end{aligned}$$

と求められます。同様にして、1アームあたりのFWDの導通損失 P_f は、

$$\begin{aligned} P_f &= \frac{1}{2\pi} \int_\pi^{2\pi} \{-i_O(\theta) \cdot V_F(\theta) \cdot d(\theta)\} d\theta \\ &= 2I_O^2 \cdot r_F \left(\frac{1}{8} - \frac{m}{3\pi} \cos \varphi \right) + \sqrt{2} \cdot I_O \cdot V_{FO} \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{m}{8} \cos \varphi \right) \quad \text{-----}(8) \end{aligned}$$

と求められます。

次に、スイッチング損失を計算するために、データシートに記載されている E_{on} 、 E_{off} 、 E_{rr} の I_C 依存性グラフの近似式を求めます。図6-7に示すように、スイッチングエネルギーの I_C 依存性カーブを直線近似し、スイッチング電圧依存性係数 $\alpha=1$ とすると E_{on} 、 E_{off} 、 E_{rr} はそれぞれ以下の式で表すことができます。

$$E_{on}(I_C) = k_{on} \cdot I_C \cdot \left(\frac{V_{CC}}{V_{CC0}} \right) \quad \text{.....(9)}$$

$$E_{off}(I_C) = k_{off} \cdot I_C \cdot \left(\frac{V_{CC}}{V_{CC0}} \right) \quad \text{.....(10)}$$

$$E_{rr}(I_F) = k_{rr} \cdot I_F \cdot \left(\frac{V_{CC}}{V_{CC0}} \right) \quad \text{.....(11)}$$

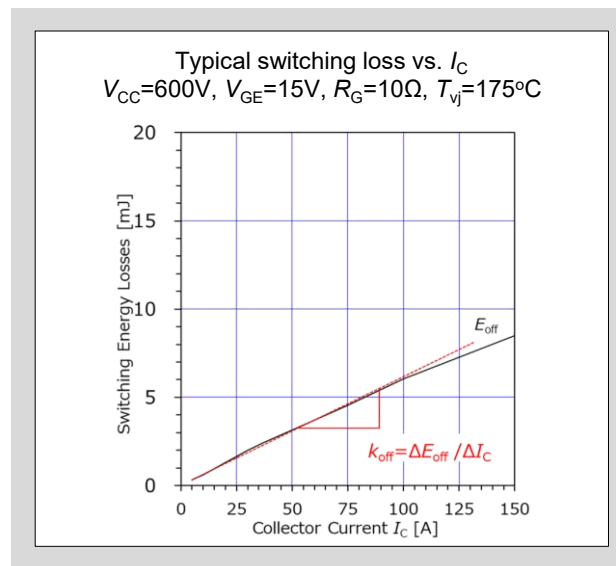


図6-7 スwitchングエネルギーの I_C 依存性の近似

(9)式を用いて、インバータ回路における1アームあたりのIGBTのターンオン損失 P_{on} は以下の式で求められます。

$$P_{on} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left\{ k_{on}(\sqrt{2} \cdot I_o \cdot \sin \theta) \cdot \frac{V_{CC}}{V_{CC0}} \cdot f_{SW} \right\} d\theta$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\pi} k_{on} \cdot I_o \cdot \frac{V_{CC}}{V_{CC0}} \cdot f_{SW} \quad \text{.....(12)}$$

同様にして、ターンオフ損失 P_{off} 、FWDの逆回復損失 P_{rr} は以下の式で計算できます。

$$P_{off} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot k_{off} \cdot I_o \cdot \frac{V_{CC}}{V_{CC0}} \cdot f_{SW} \quad \text{.....(13)}$$

$$P_{rr} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot k_{rr} \cdot I_o \cdot \frac{V_{CC}}{V_{CC0}} \cdot f_{SW} \quad \text{.....(14)}$$

以上の計算より、1アームあたりのIGBT部の発生損失 P_{IGBT} 、FWD部の発生損失 P_{FWD} は以下のように計算できます。

$$P_{IGBT} = P_{sat} + P_{on} + P_{off} \quad \text{.....(15)}$$

$$P_{FWD} = P_f + P_{rr} \quad \text{.....(16)}$$

実際には、6.2項でも述べたように $V_{CE(sat)}$ 、 V_F 、 E_{on} 、 E_{off} 、 E_{rr} の値は T_{vj} や R_G に依存して変化しますので、データシートに記載されている T_{vj} 依存性グラフや R_G 依存性グラフを参考に換算して計算してください。

5. 放熱の考え方

放熱設計では、発生損失をもとに許容温度以下となるようなヒートシンクの選定を行います。放熱設計が十分でない場合、実機運転中等に素子の許容温度を超え破壊するといった問題が発生する可能性があります。

5.1 過渡熱インピーダンスと定常熱抵抗

素子の接合部で発生する損失の放熱処理は、ヒートシンクに取付ける場合は図6-8に放熱経路を便宜的に電気的等価回路で模擬したものを示します。

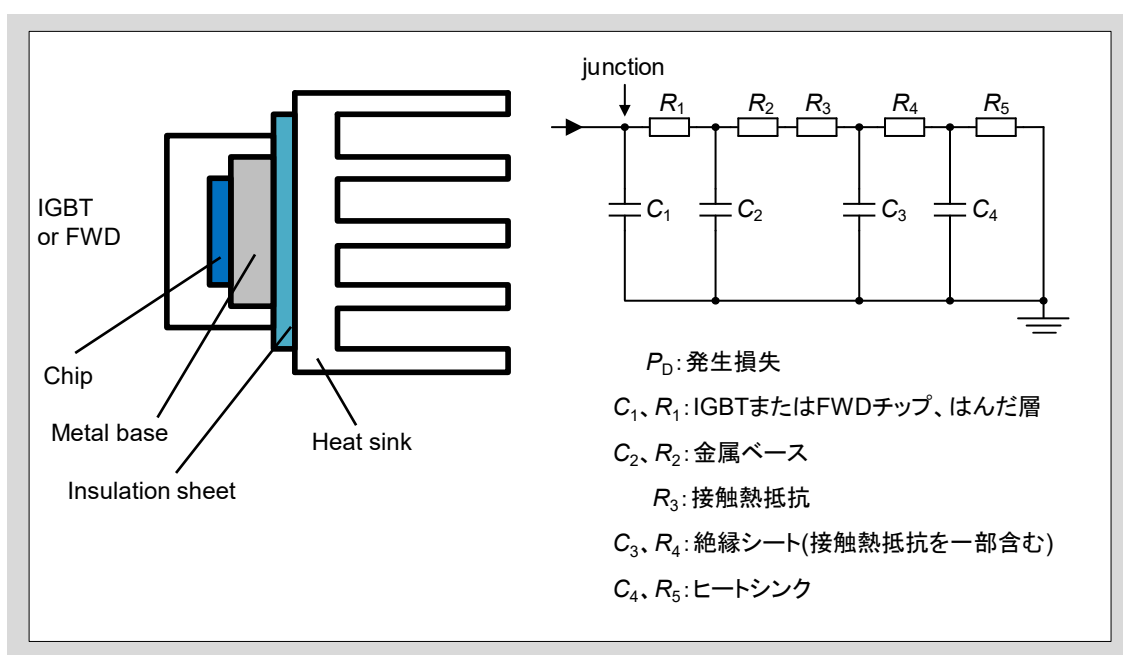


図6-8 熱挙動の電気的等価回路

過渡熱インピーダンスは図6-8の等価回路で、熱容量C₁～C₄の影響がある時間範囲のインピーダンスであり、時間の関数です。各素子の過渡熱インピーダンス特性は、データシートにその最大値が明記され、繰り返し率D≦0がそれに当たります。またヒートシンクの過渡熱インピーダンスは次式で得られます。

$$R_{f(t)} = R_{th(f-a)} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau f}} \right)$$

$$\text{ただし、}\tau f = R_{th(f-a)} \cdot V \cdot \gamma \cdot C$$

$R_{th(f-a)}$: ヒートシンク定常熱抵抗[°C/W]

t: 時間[sec]

τf : ヒートシンクの熱時定数[sec]

V: ヒートシンク体積[cm³]

γ : 比重[g / cm³]

C: 比熱[J / g・deg]

この計算に必要な材料の比重と比熱を表6-1に、アルミヒートシンク(黒色塗装)の定常熱抵抗を図6-9に示します。

表6-1 各材料の比重と比熱

材料	比重 γ [g/cm ³]	比熱 [J/g·deg]
アルミニウム	2.71	0.895
銅	8.96	0.383

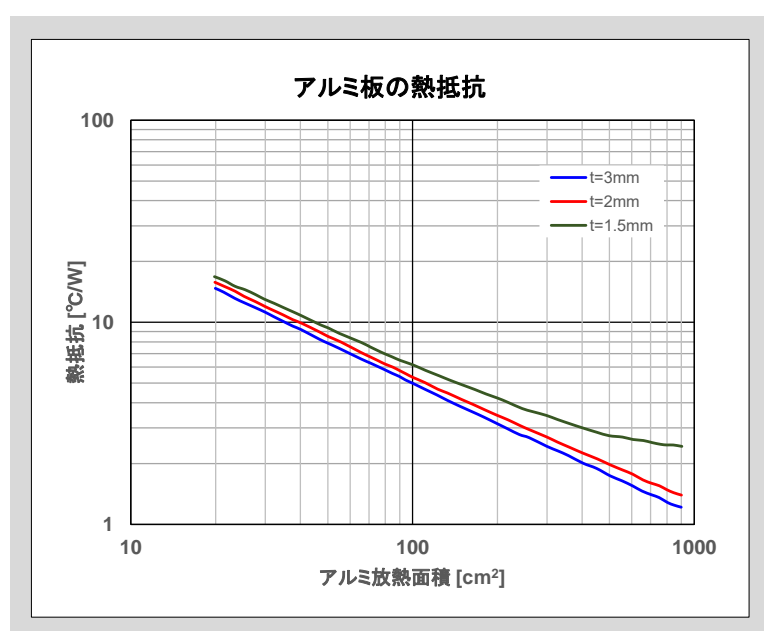


図6-9 アルミヒートシンクの定常熱抵抗

5.2 定常状態の熱方程式

定常熱抵抗は熱容量の影響が全くなくなった以降の熱抵抗であり、素子接合部温度は簡単に求めることができます。

$$T_{vj} = T_a + P_D \cdot (R_{th(j-c)} + R_{th(c-i)} + R_{th(i)} + R_{th(i-f)} + R_{th(f-a)})$$

- T_{vj} : 接合部温度
- T_a : 周囲温度
- $R_{th(j-c)}$: 接合部-ケース間熱抵抗 (IGBTまたはFWD)
- $R_{th(i)}$: 絶縁シート熱抵抗
- $R_{th(c-i)}, R_{th(i-f)}$: 接触熱抵抗
- $R_{th(f-a)}$: ヒートシンク熱抵抗
- P_D : 発生損失

5.3 過渡状態の熱方程式

一般的には前述のように平均発生損失から定常状態の T_{vj} を考えれば十分ですが、実際にはスイッチングを繰り返すごとに損失はパルス状に発生しますので図6-11に示すように温度リップルを生じます。この場合、発生損失を一定周期かつ一定ピーク値の連続矩形波パルスと考えれば仕様書記載の過渡熱抵抗曲線例(図6-10)を使用して温度リップルのピーク値 $T_{vj\text{p}}$ を近似的に下記式にて計算することができます。

この $T_{vj\text{p}}$ も $T_{vj\text{max}}$ を超えないことを確認して使用してください。

$$T_{vj\text{p}} - T_c = P \cdot \left[R_{(\infty)} \cdot \frac{t_1}{t_2} + R_{(t_1+t_2)} \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2} \right) - R_{(t_2)} + R_{(t_1)} \right]$$

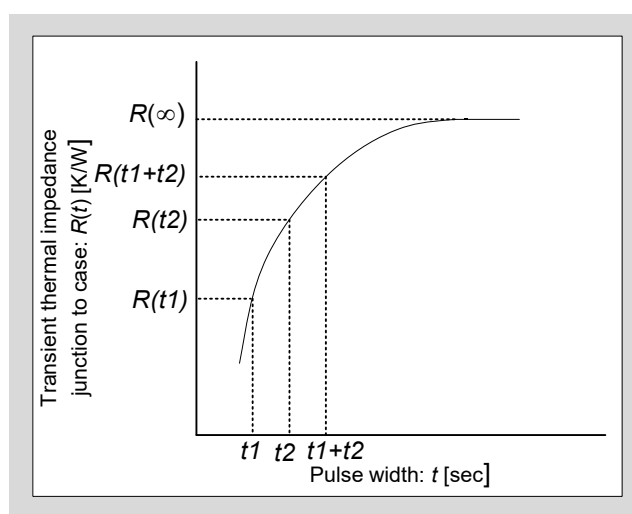


図6-10 過渡熱抵抗曲線例

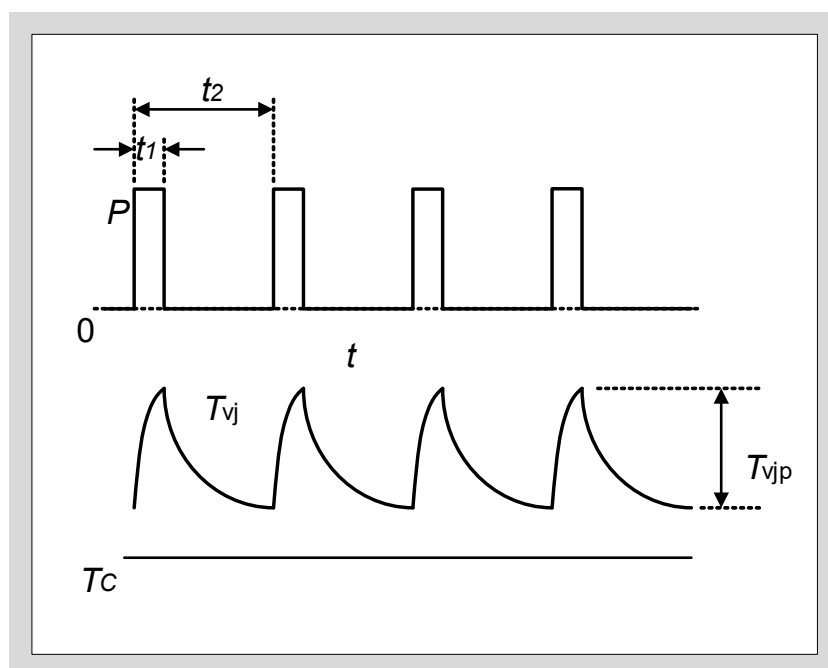


図6-11 温度リップル