

PSIMチュートリアル
熱モジュールを利用した
IGBTとMOSFETの損失計算

Mywayプラス株式会社

はじめに

サーマルモジュールは PSIM のオプションモジュールの 1 つです。これを使うと半導体デバイスとインダクタのメーカーのデータシートを使い損失計算を迅速に行うことができます。

このチュートリアルではサーマルモジュールを使った IGBT と MOSFET のパワー損失計算手順を説明します。SiC, GaN の損失計算については“チュートリアル：SiC と GaN の損失計算と過渡解析”を、インダクタの損失計算については“チュートリアル：サーマルモジュールにおけるインダクタの損失計算”を参照してください。

1. IGBT の損失計算

まず、図 1 に示した三相電圧型インバータの損失を計算します。ここでは Semikron 社の三相 IGBT モジュール SEMiX151GD066HDs を使用します。

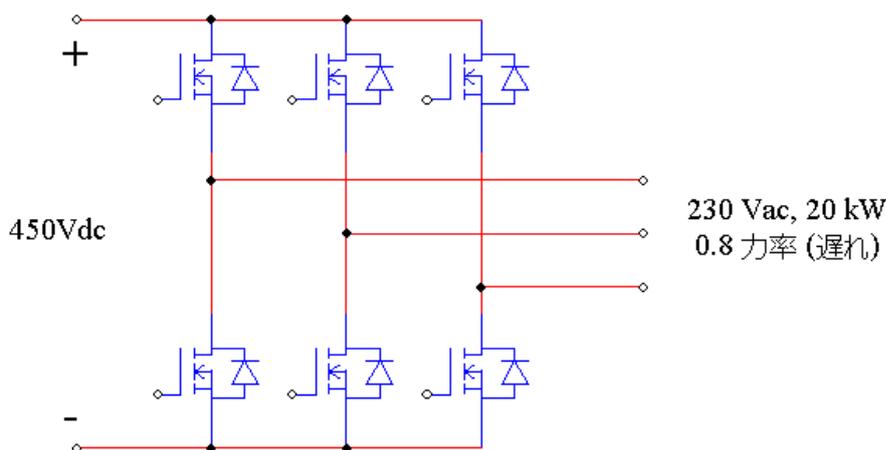


図 1 三相電圧型インバータ

インバータの動作条件は以下のようになります。

DC バス電圧	450Vdc
AC 出力	230V (線間電圧,rms) 60Hz, 20kW, 力率 0.8 (遅れ)
スイッチング周波数	8kHz

これらの値を利用して計算すると、出力電流 I_o は $62.75A(=20000/(1.732*230*0.8))$ になります

1.1. デバイスデータベースに IGBT モジュールを追加

はじめに Semikron 社の IGBT モジュール SEMIX151GD066HDs を PSIM のデバイスデータベースへ追加します。次図がデバイスファイル “IGBT.dev” に追加した後のデバイスデータベースエディタの画面です。

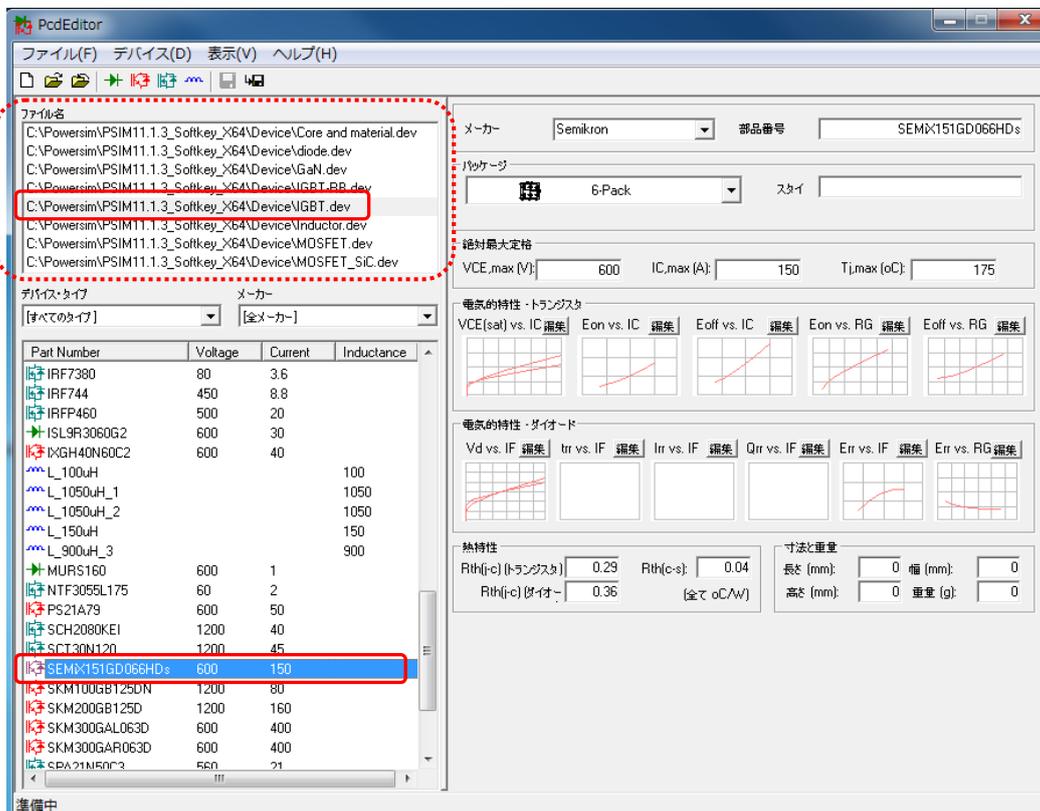


図 2 デバイスデータベースエディタ画面

1.1.1. デバイスデータベースファイルへのデバイス情報の入力

- ・PSIM のメニューバーで “ユーティリティ>>デバイスデータベースエディタ” を選択し、デバイスデータベースエディタを起動します。
- ・“ファイル名” 下にあるリストボックスからデバイスファイル “IGBT.dev” をハイライトします。“デバイス>>新しい IGBT” を選択し、新規に追加するデバイスファイルは “IGBT.dev” であること及び左下の PartNumber に “新しいテキスト” が追加されていることを確認します。

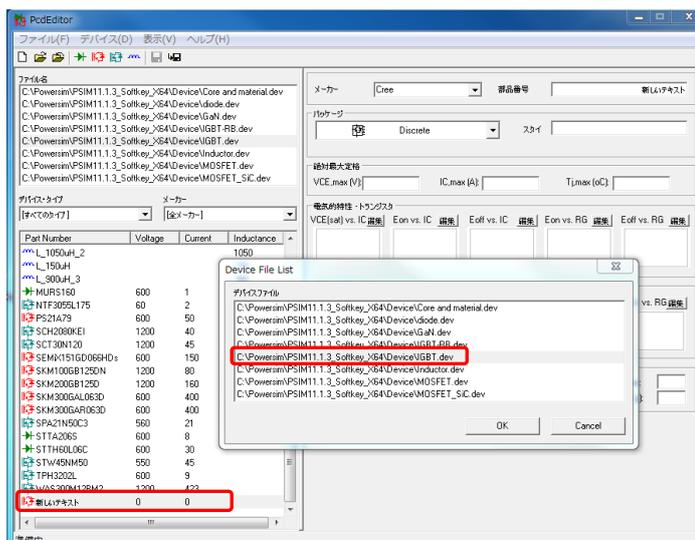


図 3 新規デバイスデータ追加画面

- ・メーカーのデータシートから次の情報を入力もしくは選択します。
 デバイスメーカー : Semikron
 部品番号 : SEMiX151GD066HDs
 パッケージ : 6-Pack
 絶対最大定格 : $V_{ce,max}=600(V)$ 、 $I_{c,max} = 150(A)$ 、 $T_{j,max} = 175(^{\circ}C)$



図 4 データシート値入力画面一部

1.1.2. キャプチャによる特性波形追加方法

SEMiX151GD066HDs のデータシート Fig.1 にデバイスの順方向特性「 $V_{ce}(sat)$ vs. I_c 」の $T_j=25^{\circ}C$ $V_{GE}=15V$,と $T_j=150^{\circ}C$ $V_{GE}=10,15,17V$ 時の波形があります。エネルギー損失 E_{on} 、 E_{off} vs. I_c は $V_{GE}=-8/+15V$ で定義されていますので $V_{GE}=+15V$ の波形を選択します。

デバイスデータベースの電気的特性に、データシートの Fig.1 から波形をキャプチャする方法を次に説明します。

- ・「 $V_{ce}(sat)$ vs. I_c 」特性グラフ右上の「編集」ボタンをクリックします。

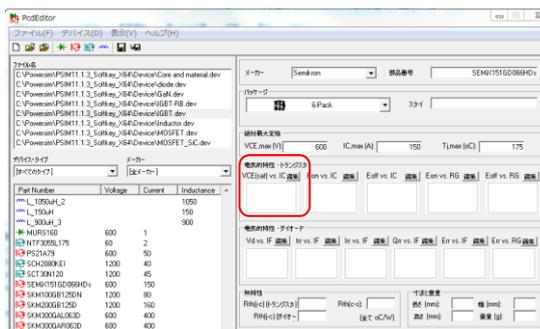


図 5 Vce(sat) vs. Ic 特性グラフ入力部分

- ・次左図特性入力ウィンドウが表示され、曲線追加をクリックすると右図が出ます。

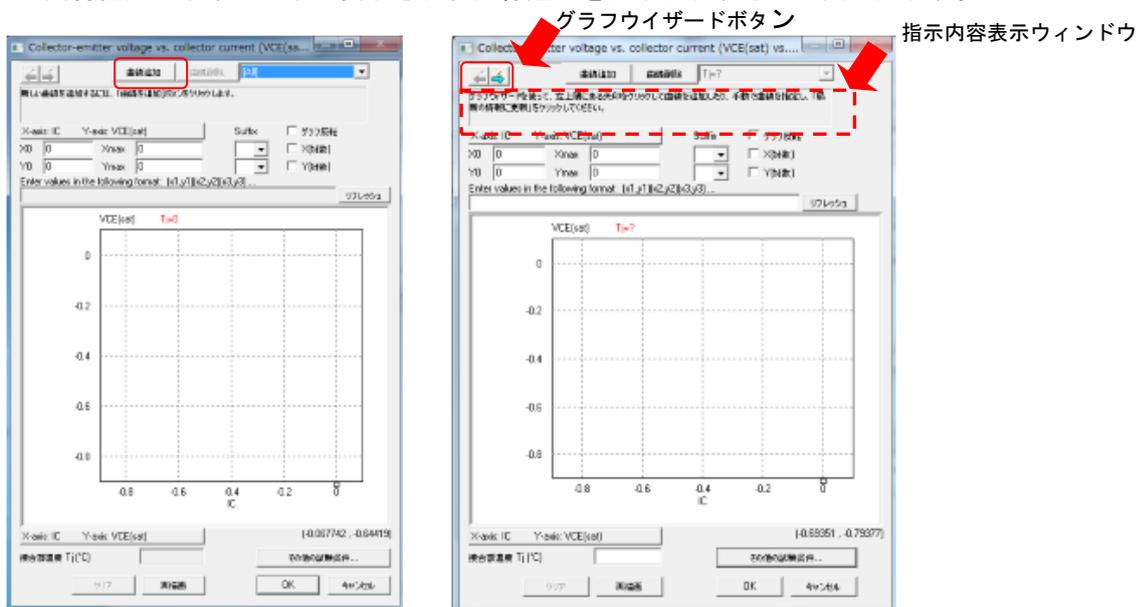


図 6 デバイスの伝導特性入力画面

- ・「曲線追加」をクリックし、左上のグラフウィザードボタン  を使って表示される指示内容によりグラフの波形をキャプチャします。
- ・Fig1 のグラフを表示し、プリントスクリーンキー (PrtSc) を使いクリップボードにコピーします。グラフウィザードボタンの  ボタンをクリックするとダイアログウィンドウに次図のようにグラフがコピーされます。

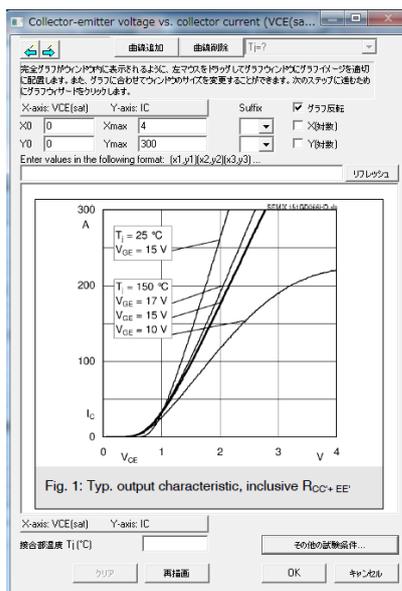


図 7 データシートの波形キャプチャ後

- ・グラフのイメージ全体がウィンドウ内に入るようにマウスで動かし、グラフウィザードボタンのをクリックして次へ進めます。
- ・グラフ上のデータポイントが設定しやすいよう、マウスの右ボタンクリックで拡大できるようにになっています。左下原点と右上の点を拡大して設定します。

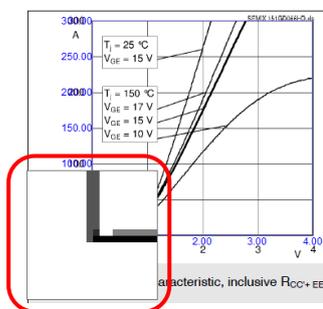


図 8 右クリックによる左下原点拡大

- ・設定が終了すると青色の枠線で囲まれますので、設定したい部分のグラフの枠と一致していることを確認してください。
- ・をクリックします。ここで、Ic は X 軸、 Vce(sat)は Y 軸です。データシートの Fig.1 の設定では X,Y 軸の設定が逆なので“グラフ反転”にチェックを入れて X0 に 0、Xmax に 4、Y0 に 0、Ymax に 300 を入力します。Suffix はこの Data では X 軸 Y 軸共に空欄です。ジャンクション温度 Tj は 25°Cを入力してください。
- ・をクリックします。25°Cの波形の原点から右クリックで拡大しながら左クリックで Data ポイントをキャプチャします。キャプチャされた波形は赤で表示されます。
- ・キャプチャしたグラフ上の点はリフレッシュボタン左のウィンドウに座標で表示され、そこで直接値の編集が可能です。例えば 2 点の座標 (-0.006135,-0.23292)

(0.71472,0.11646) を(0,0)(0.71,0.12)と値を丸めたい場合は直接入力して修正します。PSIM は 2 点間を内挿しますが、はずれ点の設定があると正しい結果が得られなくなります。設定した波形にキャプチャ元の波形からはずれた点がないよう確認してください。

- ・  をクリックするとキャプチャは終了します。

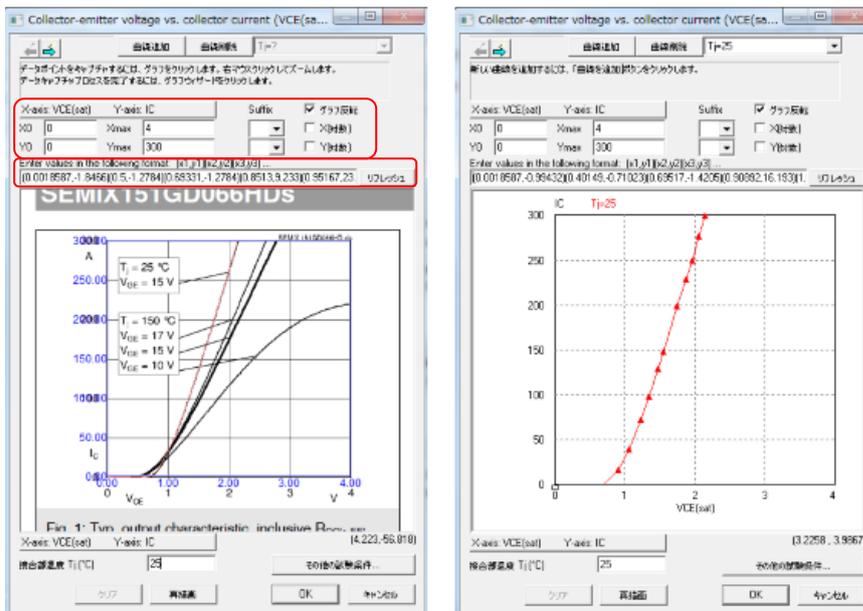


図 9 波形キャプチャ画面(左)及びキャプチャ後画面(右)

- ・ 曲線追加をクリックし 150°Cも同様に同じグラフ上にキャプチャします。
- ・ 次にトランジスタスイッチングエネルギー損失特性 Eon と Eoff vs.Ic 、Eon と Eoff vs.Rg も同様に波形入力します。

データシートの Fig3 からトランジスタの turn-on、turn-off エネルギー損失 Eon と Eoff vs.電流値 Ic の波形を、データシートの Fig4 から Eon と Eoff vs.ゲート抵抗 RG の波形を同様にキャプチャします。

これらの波形をキャプチャした際には“**その他の試験条件**”をクリックして設定項目にデータシートの Fig3,4 にある値の入力を忘れずに行ってください。

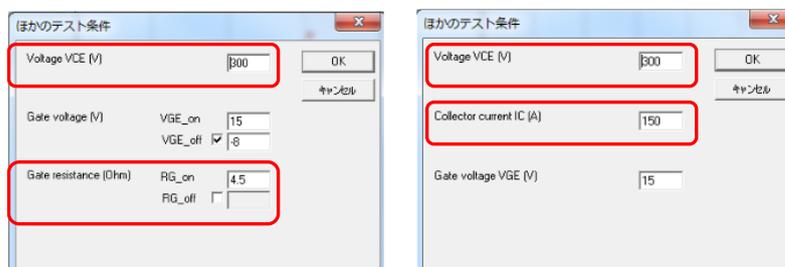


図 10 その他の試験条件入力画面

- ・ ゲート電圧値が損失計算に使用されていない場合、電圧 VCE の値、コレクタ電流 Ic、ゲート抵抗の値が計算に使用されますので正確に入力してください。

- ・ダイオードの順方向特性 V_d vs. I_F はデータシートの Fig.10 から同様にキャプチャして入力してください。
- ・ダイオードのスイッチング特性 $t_{rr}/I_{rr}/Q_{rr}/Err$ vs. I_F と Err vs. R_G を入力します。ダイオードの逆回復特性 t_{rr} , I_{rr} , Q_{rr} , 対電流 I_F , Err vs. R_G はデータシートにはありません。逆回復エネルギー Err vs. 電流 I_F だけはデータシートの Fig.3 にありますので波形を同様にキャプチャして取り込んでください。試験条件は E_{on} vs. I_C と同じです。
- ・熱特性と寸法と重量の情報を入力します。この情報は計算には使用されませんので入力必須ではありません。

以上でデバイス情報のデータベースへの入力は完了しました。

注) 新規にデバイスを追加する際には、PSIM の既存の Device フォルダに追加はせずに新規フォルダを作成して登録することをお勧めします。PSIM のバージョンアップ時にインストールすると Device フォルダは上書きされ消えてしまいます。別のデバイスファイル名にして保存しておけば新バージョンをインストールした場合でも上書きされずに残りますので新バージョンのデバイスフォルダにコピーし使用可能です。

デバイスファイルを移動する際にはメニューの“デバイス>>名前をつけてデバイスを保存”を使用します。例えば“IGBT.dev”から SEMiX151GD066HDs を新しいデバイスファイル“My_Device.dev”へ移動する場合は次のように行います。

- － 新しいデバイスファイルで“My_Device.dev”を作成します。
- － デバイス SEMiX151GD066HDs をハイライトします。デバイスをハイライトするとデバイスファイル“IGBT.dev”がファイル名のリスト中でハイライトされています。
- － ファイル名リストにある“My_Device.dev”をクリックしてハイライトします。
- － メニューの“デバイス>>名前をつけてデバイスを保存”で“My_Device.dev”にデバイスを保存します。

1.2. PSIM での損失計算

デバイスがデバイスデータベースへ追加されましたら、損失計算を PSIM で行えます。

PSIM でこのデバイスを選択するためには次図のようにメニューバーで“素子>>パワー>>サーマルモジュール>>データベースの IGBT デバイス”を選択します。

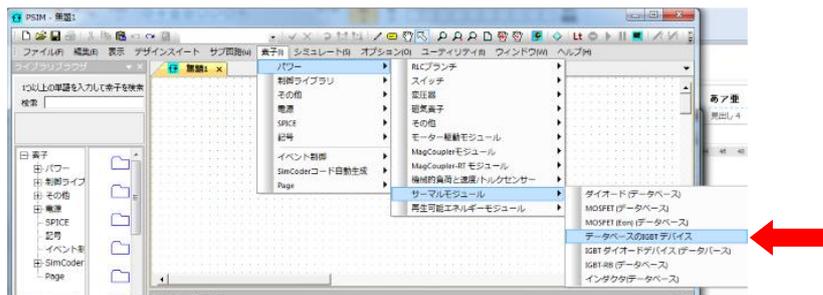
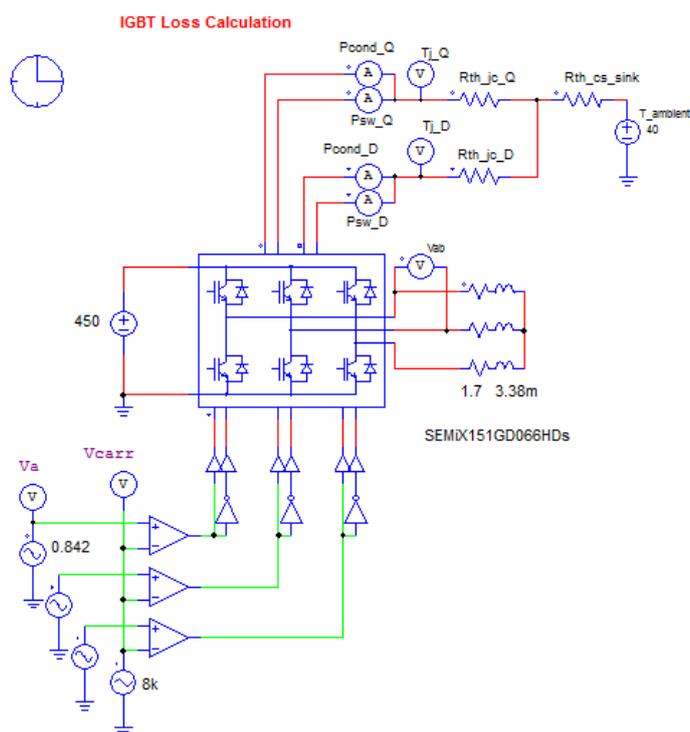


図 11 サーマルモジュール素子選択画面

回路図中に discretelGBT 素子を置きます。素子上でダブルクリックして属性ウィンドウを開きます。Device の入力欄横のブラウザのボタンをクリックしデバイス “Semikron SEMiX151GD066HDs” を選択すると IGBT イメージが 6-パックインバータブリッジへかわります。引き続き他の回路を作成します。

下図は IGBT モジュール SEMiX151GD066HDs を使用したインバータ回路です。負荷抵抗、インダクタンス、位相変調指数を回路がある特定の条件(AC 出力 230Vac、20-kW、力率 0.8(遅れ))で動くように選択します。



ここで使用している IGBT モジュールのイメージは、左側の 2 つのポートが dc バスターミナル、右側の 3 つが交流出力端子、下側の 6 つがゲート信号入力用ポートとなっています。上の 4 つのノードはパワー損失のためのノードで、左から右へ

トランジスタの伝導損失 : P_{cond_Q}

トランジスタのスイッチング損失 : P_{sw_Q}

ダイオードの伝導損失 : P_{cond_D}

ダイオードのスイッチング損失 : P_{sw_D}

となります。これらの損失は IGBT モジュール全体(IGBT スイッチ 6 個分)の損失となります。損失 P_{cond_Q} 、 P_{sw_Q} 、 P_{cond_D} 、 P_{sw_D} の単位はワットです。PSIM では、この損失電力はこれらの端子から流れる「電流」として表現されていますので、損失を測定して表示するために、電流計を各ポートと GND 間に接続しています。

IGBT モジュールのパラメータは次のように定義されます。

データベースのIGBT デバイス		ヘルプ	表示
名前	IGBT1		<input type="checkbox"/>
Device	SEMIX151GD066HDs	...	<input checked="" type="checkbox"/>
周波数	60		<input type="checkbox"/>
Rg_on (turn-on)	4.5		<input type="checkbox"/>
Rg_off (turn-off)	4.5		<input type="checkbox"/>
Pcond_Q校正係数	1		<input type="checkbox"/>
Psw_Q校正係数	1		<input type="checkbox"/>
Pcond_D校正係数	1		<input type="checkbox"/>
Psw_D校正係数	1		<input type="checkbox"/>
並列デバイス数	1		<input type="checkbox"/>

図 12 IGBT モジュールのパラメータ入力画面

パラメータ「周波数(Frequency)」は損失が計算される時間幅の定義になります。例えば、60Hz の値では 16.67ms ごとに損失の積分値、実際には積分値を周期で除算した値(時間平均)を出力します。スイッチング周期とパラメータ「周波数(Frequency)」の値を同じに設定すると、スイッチングごとの損失を計算することができます。

Rg_{on} と Rg_{off} はターンオン時及びターンオフ時のゲート抵抗値です。実際の演算状態を反映しますので正しい値を設定してください。

補正係数(Calibration Factor)は、実験結果に対して計算結果を補正する際に使用します。例えば、計算された損失が 10W であるのに対し、実験の測定損失が 12W の時、補正係数(Calibration factor)を 1.2 に設定する事で、実験結果に近い損失計算が可能となります。

ノード Pcond_Q, Psw_Q, Pcond_D, Psw_D の電圧はトランジスタやダイオードのジャンクション温度を表示します。熱等価回路はトランジスタのジャンクション温度 T_{j_Q} やダイオードのジャンクション温度 T_{j_D} を計算するために設定されています。回路中の $R_{th_jc_Q}$ や $R_{th_jc_D}$ はトランジスタとダイオードの熱抵抗となります。 $R_{th_cs_sink}$ は外圍器とヒートシンクやヒートシンクと外気の熱抵抗の合計となります。

PSIM シミュレーションからの損失結果は次のようになります。

ダイオード伝導損失	:	45.2	
ダイオードスイッチング損失	:	58.2	
ダイオード損失の合計	:	103.3	
トランジスタ伝導損失	:	165.8	
トランジスタスイッチング損失	:	163.1	
トランジスタ損失の合計	:	328.9	
全体モジュールの損失	:	432.2	単位 : (W)

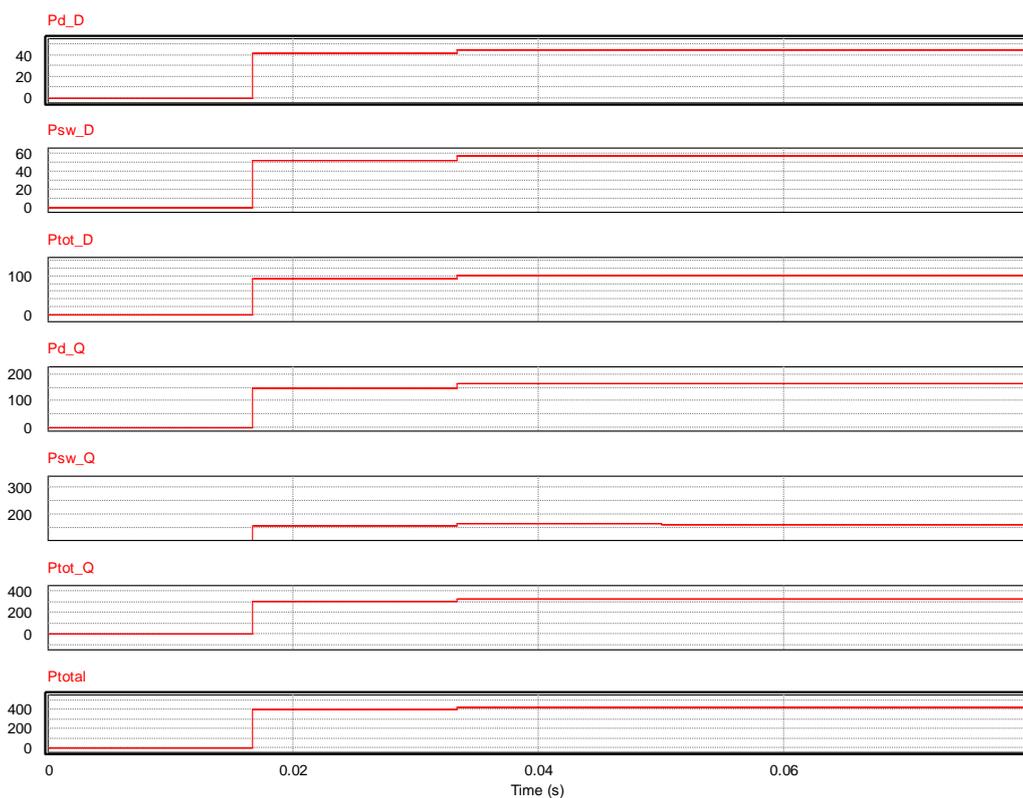
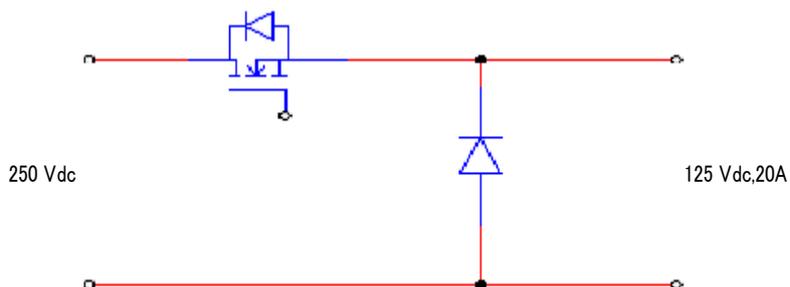


図 13 IGBT の損失シミュレーション結果

2. MOSFET 損失計算

MOSFET の損失計算の方法について説明します。International Rectifier 社の MOSFET IRFP460(500V,20A)を使った降圧コンバータのサンプルは次のようになります。



降圧コンバータの稼動条件は

- DC Input : 250Vdc
- DC Output : 125Vdc,20A
- Switching Frequency : 20kHz

2.1. デバイスデータベースに MOSFET デバイスを追加

デバイスデータベースへ MOSFET IRFP460 を追加します。

- ・ PSIM のメニューバーから “ユーティリティ>>デバイスデータベースエディタ” を開きます。
- ・ ファイル名のリストボックスで “MOSFET.dev” をハイライトします。メニューから “デバイス>>新しい MOSFET” を選択します。

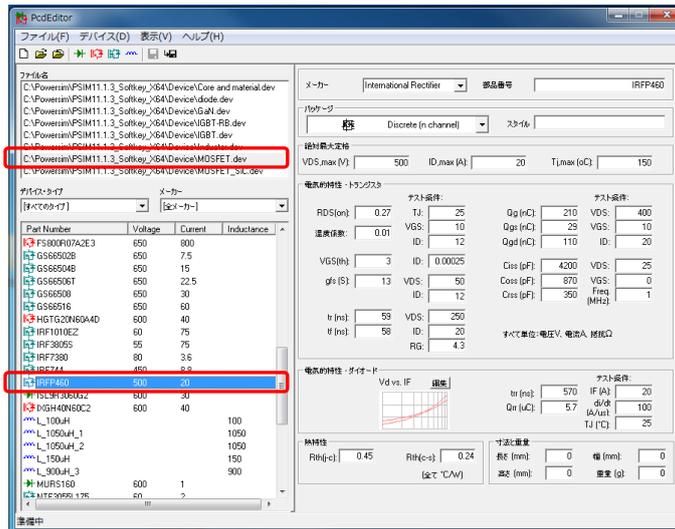


図 14 デバイスデータシートエディタ

- ・ データシートから必要な情報を入力します。次図がデータシートの一部で赤枠内の値が入力パラメータです。

SPECIFICATIONS $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise noted						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Static						
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{DS}	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	500	-	-	V
V_{DS} Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to $25\text{ }^\circ\text{C}$, $I_D = 1\text{ mA}$	-	0.63	-	V/ $^\circ\text{C}$
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	-	-	± 100	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = 500\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	25	μA
		$V_{DS} = 400\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_J = 125\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 12\text{ A}^b$	-	-	0.27	Ω
Forward Transconductance	g_{fs}	$V_{DS} = 50\text{ V}, I_D = 12\text{ A}^b$	13	-	-	S

Dynamic							
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{GS} = 0\text{ V},$ $V_{DS} = 25\text{ V},$ $f = 1.0\text{ MHz},$ see fig. 5	-	4200	-	pF	
Output Capacitance	C_{oss}		-	870	-		
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	350	-		
Total Gate Charge	Q_g	$V_{GS} = 10\text{ V}$	$I_D = 20\text{ A}, V_{DS} = 400\text{ V}$ see fig. 6 and 13 ^b	-	-	210	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}			-	-	29	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}			-	-	110	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 250\text{ V}, I_D = 20\text{ A},$ $R_G = 4.3\ \Omega, R_D = 13\ \Omega,$ see fig. 10 ^b		-	18	-	ns
Rise Time	t_r			-	59	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$			-	110	-	
Fall Time	t_f			-	58	-	
Internal Drain Inductance	L_D	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact		-	5.0	-	nH
Internal Source Inductance	L_S			-	13	-	
Drain-Source Body Diode Characteristics							
Continuous Source-Drain Diode Current	I_S	MOSFET symbol showing the integral reverse p - n junction diode		-	-	20	A
Pulsed Diode Forward Current ^a	I_{SM}			-	-	80	
Body Diode Voltage	V_{SD}	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_S = 20\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}^b$	-	-	1.8	V	
Body Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_F = 20\text{ A}, dI/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}^b$	-	570	860	ns	
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}		-	5.7	8.6	μC	
Forward Turn-On Time	t_{on}	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S and L_D)					

図 15 データシート(IRFP460)

パラメータ $V_{GS(th)}$ は MAX.値 4V と MIN.値 2V の平均値 3V を設定します。RDS(on)の温度係数はデータシートには載っていません。データシートの Fig.4 “Normalized on-resistance vs. temperature” のグラフから計算して値を出します。

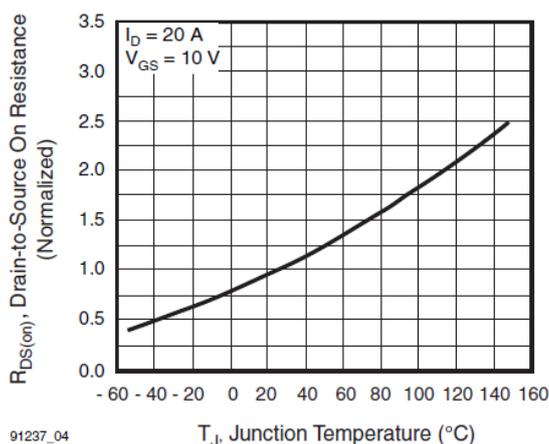


Fig. 4 - Normalized On-Resistance vs. Temperature

図 16 データシート(Fig.4)の $R_{DS(on)}$ vs. T_J

温度係数 K_T は次式で計算できます。

$$K_T = \frac{R_{DS(on)_normalized} - 1}{T_j - 25}$$

データシートの Fig.4 から $T_j=100$ 、 $R_{DS(on)_normalized}=1.8$ 、となり K_T は $K_T=0.01$ となります。

オン抵抗 $R_{DS(on)}$ は次の式で K_T を使い計算できます。

$$R_{DS(on)} = R_{DS(on)_25deg} \cdot (1 + K_T \cdot (T_j - 25))$$

ここで $R_{DS(on)_25deg}$ は 25°C でのオン抵抗でデータシートより $0.27(\Omega)$ です。

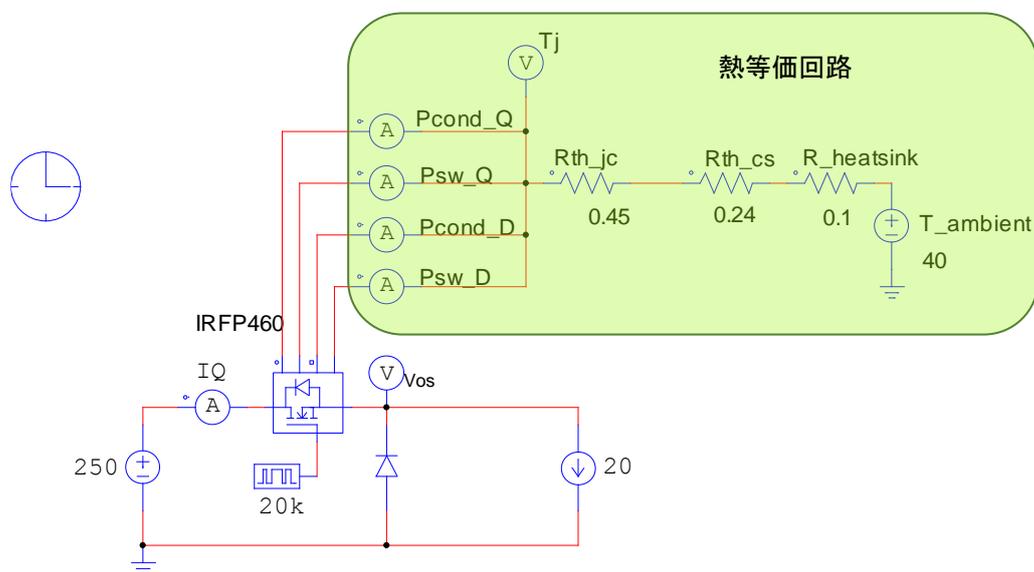
熱特性の値、寸法、重量は計算には使用しません。参照値としてのみの入力です。

2.2. PSIM での損失計算

デバイスが一旦デバイスデータシートへ追加されたら、PSIM で損失計算に使用できるようになります。PSIM でこの作成したデバイスを選択するには“素子>>パワー>>サーマルモジュール>>MOSFET(データベース)”を選択してください。回路図上に discrete MOSFET 素子を配置します。この MOSFET をダブルクリックすると属性のウィンドウが開きます。“デバイス”の入力スペースの右にあるブラウザボタンをクリックしてデバイス“IRFP460”を選択します。回路を完成させます。

次図が MOSFET IRFP460 を使った降圧コンバータの回路となります。

Loss Calculation of a MOSFET Device



上図の MOSFET 素子には上側に 4 つのノードがあります。この 4 つのノードはパワー損失のノードです。左から右へ

- トランジスタの伝導損失 : Pcond_Q
- トランジスタのスイッチング損失 : Psw_Q
- ダイオードの伝導損失 : Pcond_D

ダイオードのスイッチング損失： P_{sw_Q}

となっています。損失はこれらの端子から流れる「電流」として表現されていますので、各ポートと GND 間に電流計を接続して損失を測定します。

IGBT モジュールのパラメータは次のように定義されます。

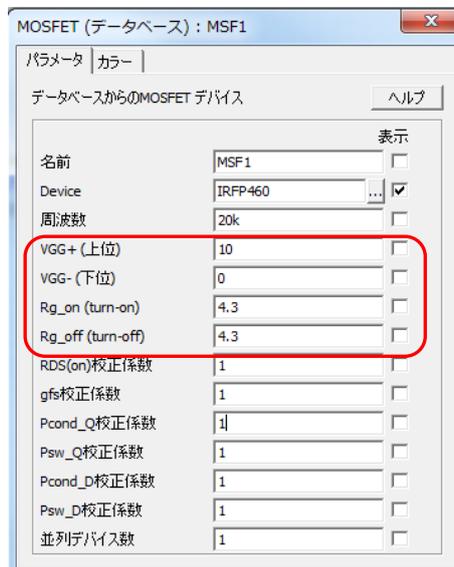


図 17 MOSFET パラメータ入力ウィンドウ

周波数は損失計算をする時間間隔となります。この例ではスイッチング周波数と同じ値となっていますのでスイッチング毎に計算されます。

VGG+と VGG-値はゲート電圧源の上限、下限です。Rg_on と Rg_off 値は turn-on と turn-off 時のゲート抵抗値です。実際の使用条件を反映するために、設定値は正確な値でなければなりません。正しく設定されていない場合、例えばゲート電圧源の値が小さすぎる場合、もしくは負荷電流がゲート抵抗が高すぎる場合、MOSFET はデバイスとして正しく機能しなくなります。

補正係数(Calibration Factor)は、実験結果に対して計算結果を補正する際に使用します。

次の損失結果は PSIM シミュレーションによる結果です。

トランジスタ伝導損失：	113.1	
トランジスタスイッチング損失：	6.5	
トランジスタ合計損失：	119.6	単位:(W)

3. まとめ

PSIM のサーマルモジュールではデバイスの伝導損失、スイッチング損失の見積りが便利に素早くできます。サーマルモジュールを使って、異なる動作条件下での確認や他のメーカーのデバイスと比較しながら損失を検討することができます。

ご注意

1. 本資料に記載された製品の仕様は、予告なく変更することがあります。
2. 本資料の内容については、万全を期しておりますが、万一ご不明な点などがありましたら、弊社までお申しつけください。
3. 本資料に記載された情報に起因する損害または特許権その他権利の侵害に関しては、弊社は一切の責任を負いません。
4. 本資料によって第三者または弊社の特許権その他権利の実施権を許諾するものではありません。
5. 弊社の書面許諾なく、本資料の一部または全部を無断で複製することを固くお断りします。
6. 本資料に記載されている会社名、商品名は、各社の商標または登録商標です。

Copyright 2018 by Myway Plus Corporation.

All rights reserved. No part of this manual may be photocopied or reproduced in any form or by any means without the written permission of Myway Plus Corporation. Co., Ltd.

発行：Myway プラス株式会社

〒222-0022

横浜市西区花咲町 6-145 横浜花咲ビル

TEL : 045-548-8831

FAX : 045-548-8832

ホームページ : <https://www.myway.co.jp>

Eメール : sales@myway.co.jp
