SiC及びGaNの損失計算と過渡解析

Mywayプラス株式会社

はじめに

SiC や GaN デバイスのようなワイドバンドギャップのデバイスはその高速スイッチングと低損失によりパワエレのアプリケーションとして使用されることが増えています。このチュートリアルではこれらのデバイスの過渡動作と損失を PSIM のサーマルモジュールと SPICE モジュールを使用して PSIM でどのようにシミュレーションし解析するかを説明します。

例として Cree 社 SiC デバイス C3M0065090J(900V,35A)と GaN システム社の GaN HEMT G66508(650V,30A)を使用します。サーマルモジュールのパワー損失の結果を SPICE シミュレーションの結果と比較します。

1.　SiC デバイスの損失計算

損失計算を行うためには、最初にデバイスデータベースへデータを追加します。PSIM のメニューバーの“Utility>>デバイスデータベースエディタ”をクリックします。新しいデバイスを追加する場合、既存の”MOSFET_SiC.dev”に追加するか、“ファイル>>新しいデバイスファイル”により新しいデバイスファイルを生成し追加するかの 2 つの方法があります。ここではまず SiC デバイスを追加するために“デバイス>>新しい MOSFET(Eon) ”を選択します。使用するデバイスは Cree の SiC C3M0065090J、900V35A で次のようなデバイスです。

サンプル回路で使用しているデバイスデータベースのデータは古い場合がございますので必ず各メーカーの最新のデータシートをご確認の上お使いください。

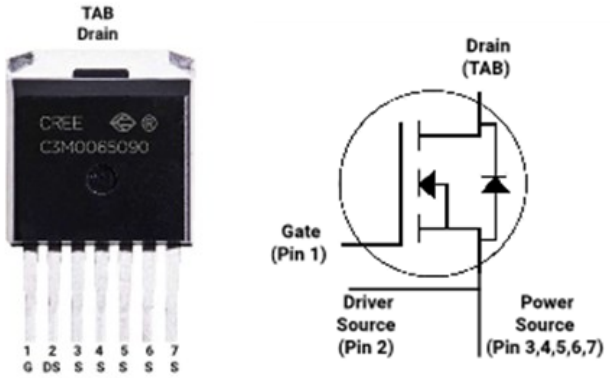


図 1　C3M0065090J 外形及び内部回路図

Cree の SiC　C3M0065090J を追加するにはメーカーのデータシートからの情報やトランジスタやダイオードの特性カーブをデバイスデータベースエディタで入力します。

デバイス特性のカーブはゲート・ソース間電圧 VGS の設定値を振った何種類かのカーブとなっていますので、まず回路で使用する VGS を定義する必要があります。例えば VGS＝-4V /+15V と定義します。データシートの曲線のキャプチャ方法は PSIM マニュアルのサーマルモジュールの章の“4.10.7 データベースにデバイスを追加”部分もしくはチュートリアル「PSIM による

熱モジュールを利用したIGBTとMOSFETの損失計算」に詳細がありますので参照して下さい。

C3M0065090J のデータシートにあるグラフから次の各々のカーブをキャプチャします。図の番号はデータシート中のグラフの番号です。

VDS vs. IDS：	Fig.1,2,3 (@V_{GS}=15V)
VDS vs. IDS(3rd)：	Fig.13,14,15 (@V_{GS}=15V)第 3 象限の特性でゲート信号に対して IDS は負の領域です。
Eon vs. IDS：	Fig.24,26　Fig.24 は 25℃の時の Eon vs. IDS のカーブです。 Fig26 を使用して他のジャンクション温度、例えば Fig.26 からは IDS=20A の時の温度 25、100、150℃の Eon を読み取れます。 100、150℃の Eon vs. IDS は 25℃の時のカーブと同じ傾きとなることを仮定して設定しています。Fig.26 の値を読み込む場合は“ユーティリティ>>曲線キャプチャツール”を使います。
Eoff vs. IDS：	Fig.24、Fig.26　上記 Eon vs. IDS の場合と同様にして取り込みます。
Eon vs.RG：	Fig.25
Eoff vs.RG：	Fig.25
Eon vs.VDS(@IDS1)：	Fig.23,24　ある電流値（ここでは IDS1=20A ）での Eon vs. VDS(@IDS1)のカーブです。IDS1=20A の時の Eon 値を Fig.23,Fig.24 から読み取ります。
Eoff vs.VDS(@IDS1)：	Fig.23,24　ある電流 IDS1 の時の Eoff vs. VDS (@IDS1 =20A)です。IDS1=20A の時の Eoff 値を Fig.23,Fig.24 の IDS=20A の時の値から読み取ります。
Eon vs.VDS(@IDS2)：	Fig.23,24　ある電流値 IDS2 での Eon vs.VDS(@IDS2) のカーブです。ここでは IDS2=30A の時 Eon 値を Fig.23,Fig.24 から読み取ります。
Eoff vs.VDS(@IDS2)：	Fig.23,24 ある電流値 IDS2 の時 Eoff vs.VDS(@IDS2) のカーブです。ここでは IDS2=30A の時 Eoff 値を Fig.23,Fig.24 から読み取ります。
VD vs.IF：	Fig.8,9,10 には V_{GS}=-4V のボディーダイオードの導通特性があります。
Qrr vs.IF：	逆方向ダイオードの特性曲線はありません。 Qrr=245 nC at ISD=20A and Tj=150℃のポイントデータを Qrr vs. IF に追加します。

入力を終了するとデバイス C3M0065090J は次のようにデバイスデータベースエディタで表示されます。

注)トランジスタのゲート電圧がかかり、ドレインーソース電流が負の場合(IDS <0)、デバイスは第 3 象限で動作することに注意してください。デバイスの導通損失は次のように計算されます。

- VDS vs. IDS(3rd)のグラフがない場合、電流はトランジスタとダイオードの両方に流れると仮定します。各々の電流は PSIM によって自動的に計算されます。VDS vs. IDS がトランジスタの導通損失の計算に使用され、VD vs. IF がボディダイオードの導通損失の計算に使用されます。
- VDS vs. IDS(3rd)のグラフがある場合、トランジスタに流れる電流がすべてであると仮定され、VDS vs. IDS(3rd)のグラフを使用して導通損失が計算されます。実際にはトランジスタとダイオードの両方に電流は流れます。しかし、トランジスタに流れる電流が大部分で、ダイオードに流れる電流は無視できるからです。

図 2　C3M0065090J デバイスデータエディタ画面

データベースにデバイスがあれば PSIM で損失計算に使用することができます。

PSIM のメニューで“素子>>パワー>>サーマルモジュール”から、MOSFET(Eon)(データベース)を選択して回路図上に素子を置きます。素子をダブルクリックして開いたウィンドウの“デバイス”入力スペース右横にあるブラウズボタンをクリックすると“デバイス検索”のウィンドウが開きます。そこで使用したいデバイスを検索して設定します。例では C30065090J を選択します。

次の回路図はデバイス C30065090J を使った降圧コンバータの回路です。

回路の動作条件は

入力電圧：　400V

負荷電流：　20A

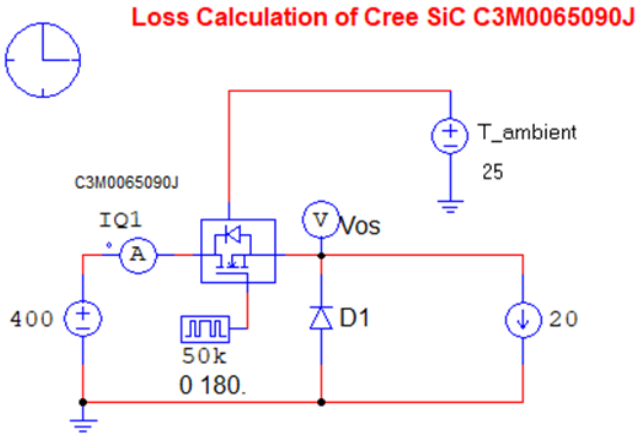
スイッチング周波数：　50kHz

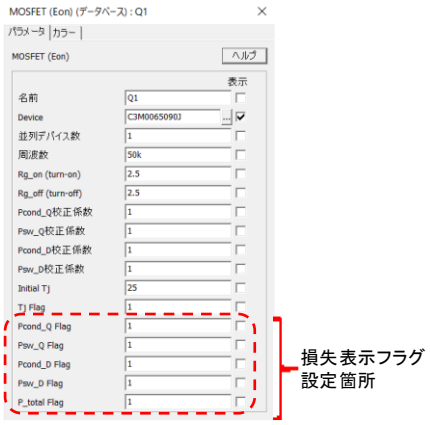
Duty cycle：　0.5

Tj：　25℃

V_{GS}：　-4V/+15V

Rg(ext)：　2.5Ohm





PSIM V12.0 からデバイスデータにパワーモジュール内の熱回路部分が含まれるようになり、Thermal モデル素子の Thermal ノードが 1 つになりました。環境温度(T_ambient) はこのノードへ電圧源で接続します(25℃の場合、Vdc=25v)。PSIMv11.1.7 以前に有った 4 つのノード（トランジスタ導通損失 Pd_Q、トランジスタスイッチング損失 Psw_Q、逆並列ダイオード導通損失 Pd_D,逆並列ダイオードスイッチング損失 Psw_D）のモニターは、素子プロパティ画面の各損失(発熱)項目の Flag を“1”に設定して表示します。

シミュレーションによるトランジスタの損失は

導通損失：　Pd_Q＝13.4W

スイッチング損失：　Psw_Q=3.2W

この場合、ボディーダイオードの損失値はありません。

2.　GaN の損失計算

デバイスデータベースエディタにあります GaN デバイスを追加します。“デバイス>>MOSFET(Eon)”から選択します。GaN システムの GaN HEMT GS66508B は 650V 30A で次のようなデバイスです。サンプル回路で使用しているデバイスデータベースのデータは古い場合がありますので、ご使用時には最新のデータシートをご確認の上、お使いください。

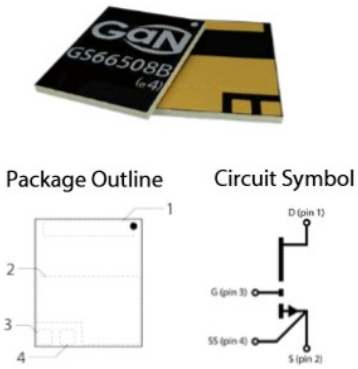


図 3　GS66508B の外形及び内部回路図

メーカーのデータシートを使ってデバイスデータベースエディタに必要な情報を入力していきます。このサンプルの場合ゲート・ソース電圧は−3V／+6V となっています。次の特性曲線を GS66508B のデータシートからキャプチャします。

VDS vs. IDS：V_{GS}=6V のときの特性がデータシート Fig.5 にあります。
このカーブをキャプチャする場合、電流の温度依存が大きいため(25℃では 0 から 86A ,100℃では 0 から 45A)PSIM 内で電流値補間をするために電流範囲を 0 から 30A として温度は 25,75,150℃の波形をキャプチャします。

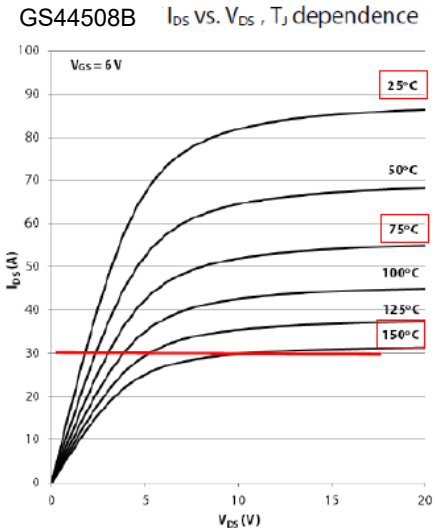


Figure 5 : Typical I_{DS} vs. V_{DS} @ V_{GS} = 6 V

VDS vs. IDS(3rd)：Fig9 の V_{GS}=6V のグラフになります。
Gate プラス、IDS マイナス領域の特性です。

Vd vs. IF：　Fig9 の V_{GS}=－2V のグラフになります。
GaN HEMT デバイスにはボディダイオードはありません。
トランジスタのゲート信号が低く、電流 IDS が負となる動作で使用されます。

データシートにはないデータについては直接メーカーから入手しています。
入力が終了したデバイスデータエディタのデバイス GS66508B は次のようになります。

図 4　GS66508 デバイスデータエディタ画面

データベースにデバイスのデータを作成すれば PSIM で損失計算ができます。PSIM の“素子>>パワー>>サーマルモジュール”で MOSFET(Eon)(database)を選択し回路図中に配置します。素子をダブルクリックして開くウィンドウの Device の横のブラウズボタンをクリックしデバイス GS66508 を選択し設定します。

次の回路図は GS66508 を使用した降圧コンバータです。回路の動作条件としては

入力電圧：　400V

負荷電流：　20A

スイッチング周波数：　100kHz

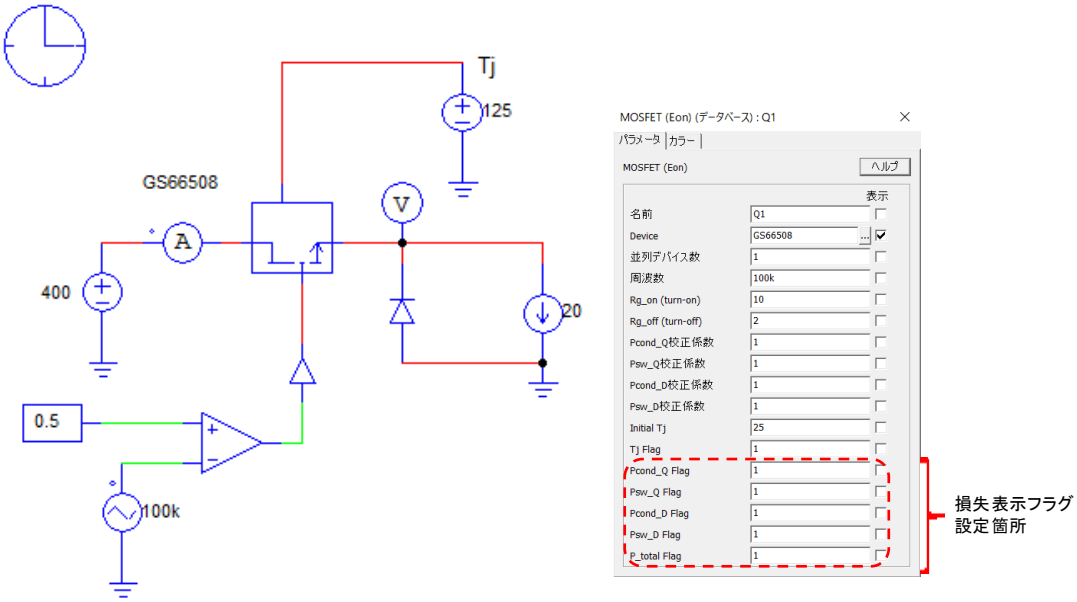
Duty cycle：　0.5

Tj:　125℃

V_{GS}:　-3V/+6V

Rg_on:　10 Ohm

Rg_off:　2 Ohm



PSIM V12.0 からデバイスデータにパワーモジュール内の熱等価回路部分が含まれるようになり、Thermal モデル素子の Thermal ノードが 1 つになりました。環境温度(T_ambient) はこのノードへ電圧で接続します(125℃の場合、Vdc=125v)。PSIMv11.1.7 以前に有った 4 つのノード（トランジスタ導通損失 Pd_Q、トランジスタスイッチング損失 Psw_Q、逆並列ダイオード導通損失 Pd_D,逆並列ダイオードスイッチング損失 Psw_D）のモニターは、素子プロパティ画面の各損失(発熱)項目の Flag を“1”に設定して表示します。

シミュレーション結果は次のようになります。

導通損失：　　Pd_Q＝28.4W

スイッチング損失：　Psw_Q＝8.6W

3.　SPICE 過渡解析

PSIM の SPICE モジュールでは SPICE モデルを使用した SiC や GaN デバイスのスイッチング・トランジェントについても LTspice を使用して PSIM の環境で便利に解析できます。

SiC デバイス C3M0065090J と GaN デバイス GS66508 は LTspice 用の SPICE モデルがメーカーから提供されています。これらのモデルを使ったシミュレーションの結果は次のようになります。

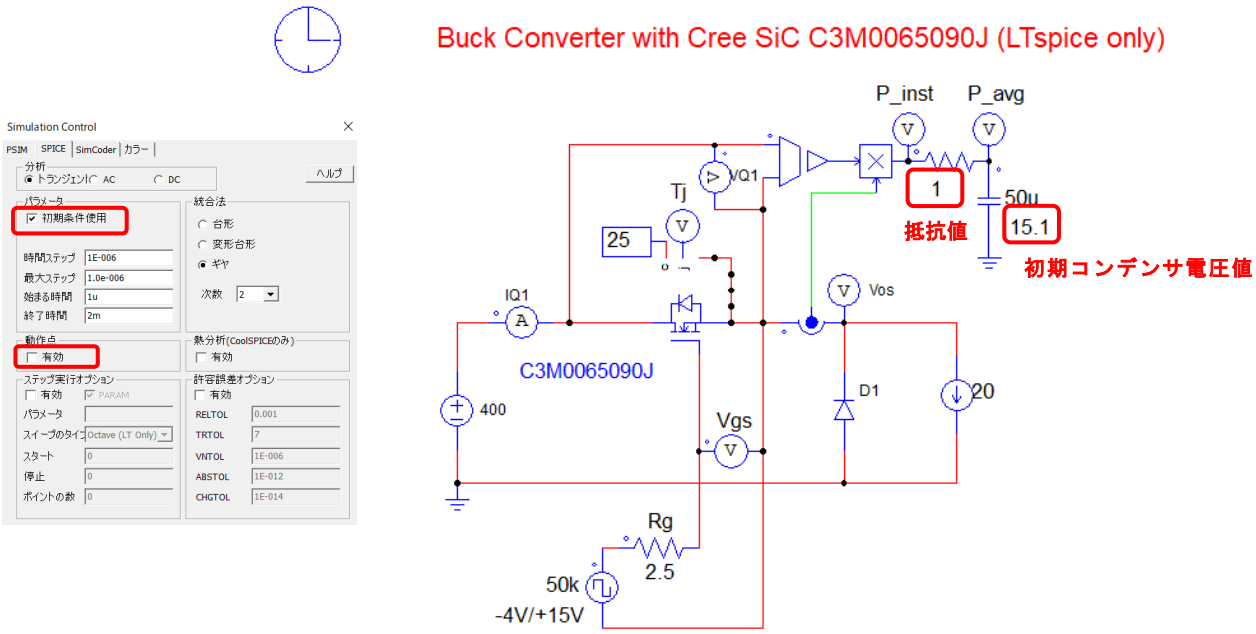
1 の C3M0065090J の降圧コンバータ回路と同等の SPICE 用回路及びシミュレーションコントロールの設定は次のようになります。

回路ファイルは“ファイル>>範例を開く”から

フォルダ：¥examples¥SiC & GaN devices¥SiC C3M0065090J (Cree)

ファイル名：Buck - SiC C3M0065090J (LT).psimsch

のサンプル回路を選択し次の赤枠の設定へ変更してお使いください。

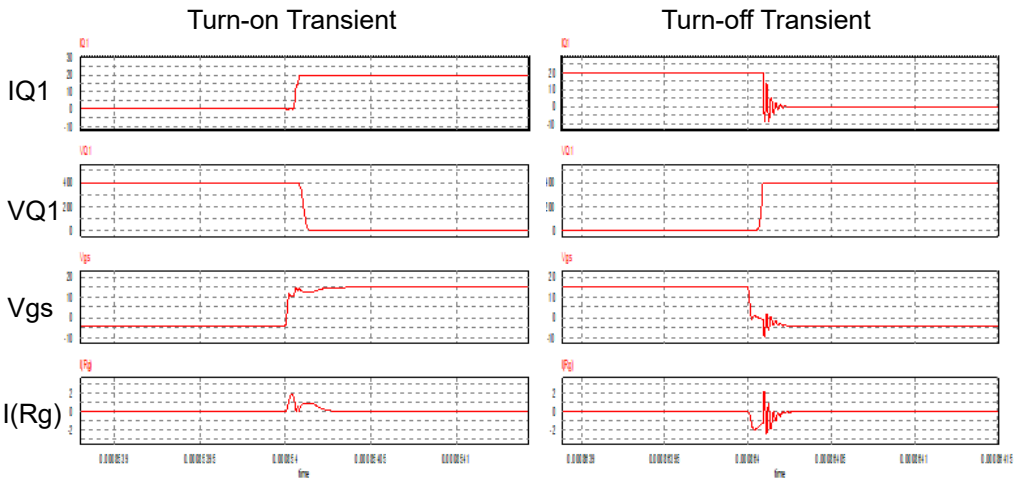


シミュレーションコントロールの変更点

・初期条件使用にチェックを入れてください。

・動作点　有効のチェックをはずしてください。

トランジスタのターンオン、ターンオフ過渡解析結果の波形は次のようになります。



波形は上からターンオン、ターンオフ時のトランジスタの電圧、電流、ゲート電圧、ゲート電流となります。

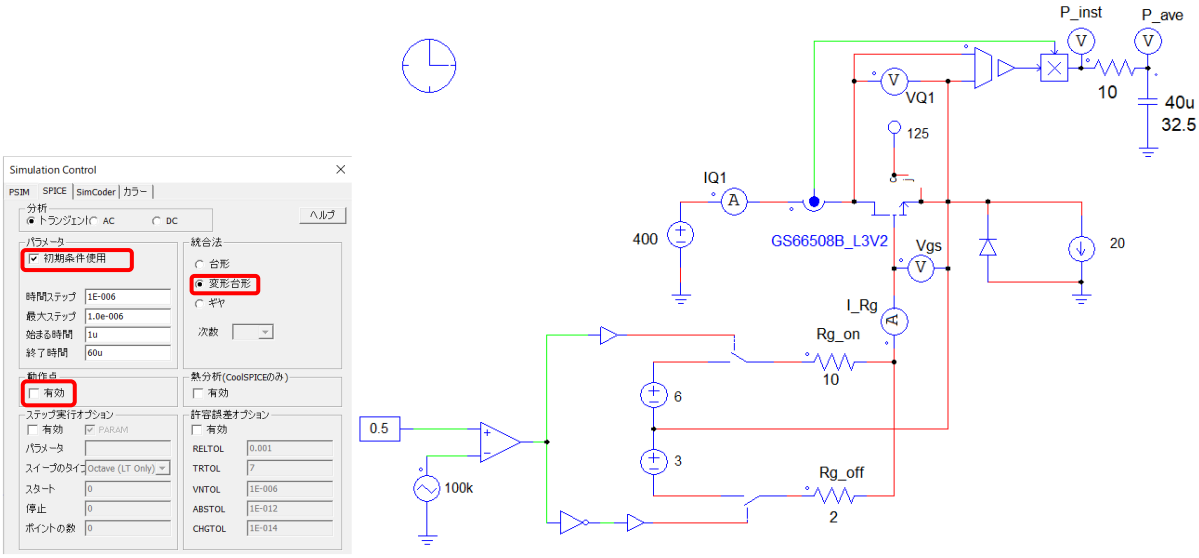
GaN デバイスについても同様に解析できます。2 で解析した回路と同等の降圧コンバータ SPICE 用回路及びシミュレーションコントロールの設定は次にようになります。

回路ファイルは

フォルダ：¥examples¥SiC & GaN devices¥GaN GS66508 (GaN Systems)

ファイル名：buck - GaN GS66508 (LT).psimsch

を次の設定へ変更してください。



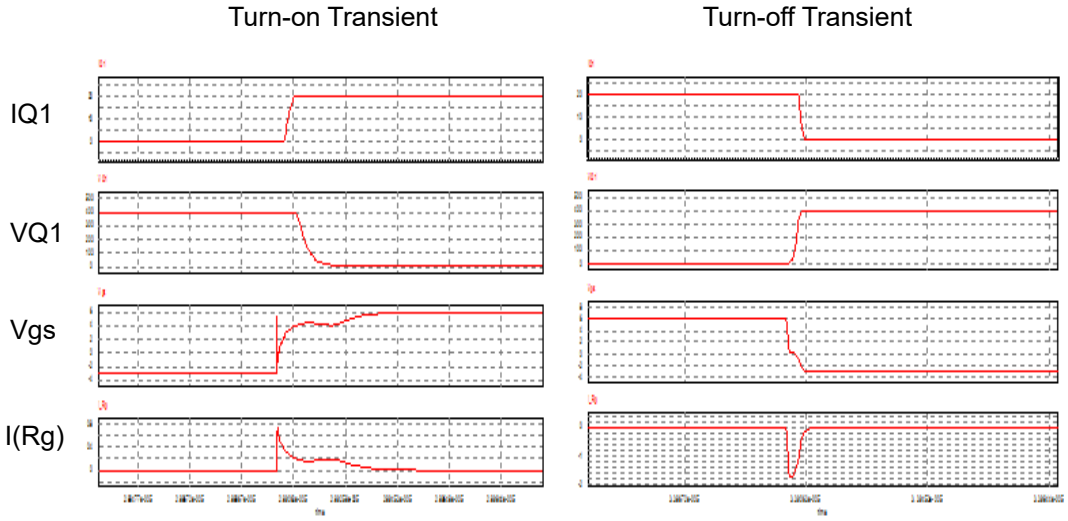
シミュレーションコントロールの変更点

・”初期条件使用”にチェックを入れてください。

・動作点“有効”のチェックをはずしてください。

・統合法を変形台形としてください。

トランジスタターンオン、ターンオフ時の波形は次のようになります。



4.　サーマルモジュールと SPICE の損失結果比較

トランジスタの電圧と電流の積の平均をとることで SPICE シミュレーションからも損失を計算できます。サーマルモジュールと SPICE の結果比較は次のようになります。

Cree の SiC　C3M0065090j を使用した降圧コンバータの結果です。

Ver12.0.4		
Transistor Loss(W)	Thermal Module	LT spice
P_total	16.6	15.2
P_conduction	13.4	12.7
P_switching	3.2	2.5
Simulation time	<1sec	9sec
(studytime：2ms)		

サーマルモデルと SPICE の損失結果はかなり近い値となっています。

GaNGS66508 を使用した場合の降圧コンバータの結果です。

Tj=25℃の時

Ver12.0.4		
Transistor Loss(W)	Thermal Module	LT spice
P_total	18.2	13.5
P_conduction	11.7	10.4
P_switching	6.5	3.2
Simulation time	<1sec	20sec
(studytime：60us)		

Tj=125℃の時

Ver12.0.4		
Transistor Loss(W)	Thermal Module	LT spice
P_total	37.0	32.6
P_conduction	28.4	25.6
P_switching	8.6	7.0
Simulation time	<1sec	18sec
(studytime：60us)		

PSIM サーマルモデルと SPICE の損失結果はかなり近い値となっています。

GaN　GS66508 の降圧コンバータでは dc 入力電圧が 400V から 200V へ変更されると SPICE シミュレーションは 160us 付近でハングアップします。

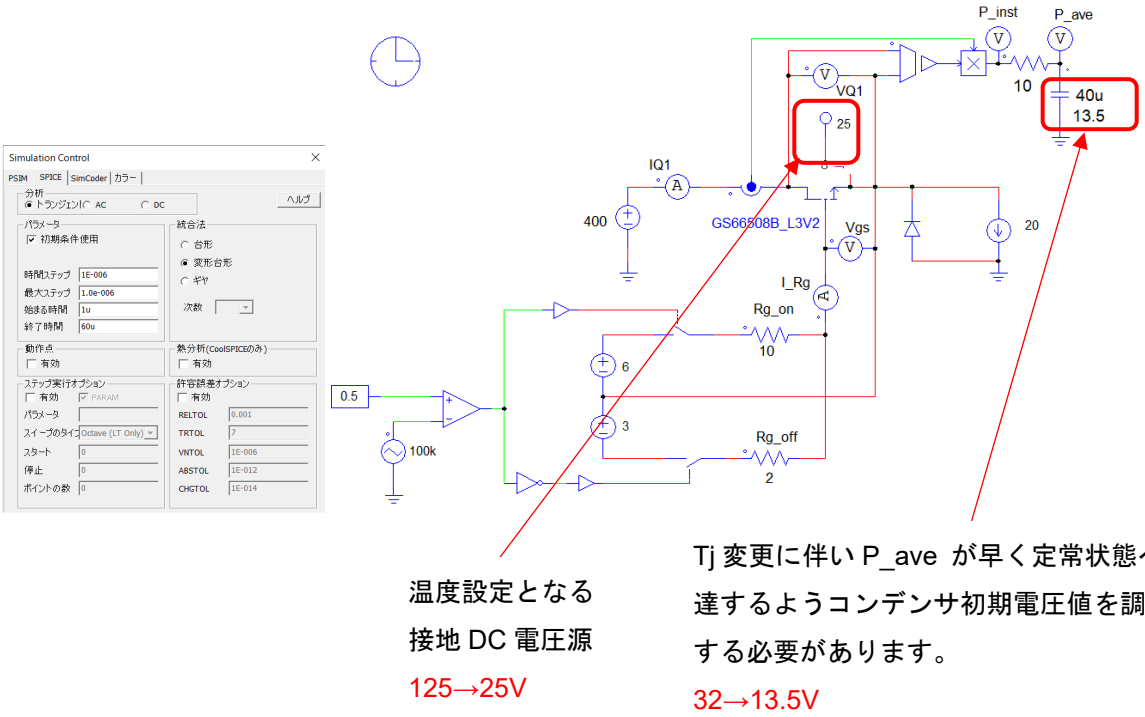
注）損失結果比較表中の値が原文と違う点について。

原文（Tutorial - SiC and GaN loss calculation and transient analysis）は Ver.11 による結果のため、デバイスデータにパワーモジュール内の熱等価回路部分が含まれておりません。熱等価回路部分を外付けで追加することで今回の PSIM Ver.12 の結果と同等の値となります。

開発元へは日本で Ver.12 の結果でリリースすることについては同意を得ており、値についても合意されております。

（ご参考）GaNGS66508 を使用した場合の降圧コンバータの Tj=25 ℃の時の SPICE 用回路設定例

10 ページ Tj=125℃の設定からの変更点　赤枠素子を赤字の値へ変更してください。



注）微妙な調整値によりハングアップいたしますので上記設定値を変更する場合はご注意ください。

LTspice につきましては現時点では PSIM に途中停止機能がついておりませんので、シャットダウンして立ち上げ直していただくようになりますので、ご了承いただくようお願いいたします。

5.　まとめ

以上ここまでの 2 例からわかることは

- SiC と GaN の損失はメーカーのデータシートの情報を元にして PSIM で簡単に計算できます。
- サーマルモジュールと LTspice シミュレーションの損失計算結果はほぼ等しくなります。
- SPICE モデルを元にした SiC と GaN の詳細な過渡解析が PSIM でも実行できます。SPICE シミュレーションはデバイススイッチングの過渡現象に関して貴重な見識を提供し、設計者が電圧/電流のオーバーシュートやストレス、ゲート駆動回路の設計をするのに役立ちます。

PSIM は、デバイスレベルの詳細な解析や動作、および制御解析などを実行する機能を備えており、すべてのパワーエレクトロニクスニーズに対応したシミュレーションと設計環境を提供します。

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 2020 by Myway 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 Corporation.