

第1章 基本コンセプトと特徴

1. SiCハイブリッドモジュールの基本コンセプト	1-2
2. SiCハイブリッドモジュールの特徴	1-2
3. SiCハイブリッドモジュールのスイッチング定義	1-6

Siデバイスに替わり、耐熱性と高破壊電界耐量を持ったSiCデバイスが、装置の高効率化や小型化を実現するものとして有望視されています。富士電機では、省エネに貢献するインバータ用のパワーデバイスとして、1200V～3300V耐圧のSiCハイブリッドモジュールを製品化しています。

SiCハイブリッドモジュールは、メインスイッチングデバイスにはSi-IGBTチップを適用し、FWDにはSiC-SBD (Schottky Barrier Diode)チップを採用しました。これにより従来のSiモジュールに比べて更なる特性改善を行いました。

本章ではSiCハイブリッドモジュールの特徴について、詳しく述べます。

1. SiCハイブリッドモジュールの基本コンセプト

地球温暖化を防止するために、これまで以上にCO₂などの温室効果ガスの削減が求められています。その削減手段の一つに、パワーエレクトロニクス機器の省エネルギー化があります。その中で重要なアイテムが、インバータを構成するパワーデバイス、回路、制御などの技術革新によるインバータの高効率化と小型化です。

低損失要求が強いパワーデバイスで、代表的なIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールは、今までSi(シリコン)のIGBTチップとFWD (Free Wheeling Diode) チップを用いてきました。しかし、Siデバイスの性能は、物性に基づく理論限界に近づきつつあります。そこで、Siの限界を超える耐熱性と高破壊電界耐量を持ったSiC(炭化ケイ素)デバイスが、装置の高効率化や小型化を実現するものとして期待されています。

このような背景から、SiCハイブリッドモジュール (Si-IGBT + SiC-SBD) では、「装置の高効率化や小型化」を基本コンセプトに開発を行ないました。

IGBTモジュールに対する基本的な市場要求は性能と信頼性の向上、環境負荷の低減です。性能、環境、信頼性に対する各諸特性は相互に関連し合っているため、装置の高効率化や小型化を実現するためには、これらをバランスよく改善することが重要となります。

2. SiCハイブリッドモジュールの特徴

2.1 製品の構成

SiCハイブリッドモジュールの系列を表1に示します。400VAC系用1200V耐圧SiC-SBDを使った2in1、690VAC系用1700V耐圧SiC-SBDを使った2in1及び、電鉄用途の3300V耐圧のSiCハイブリッドモジュールを製品化しています。これらのSiCハイブリッドモジュールを使った装置では、従来のSi-IGBTモジュールに比べて発生損失が約25%※減少します。

(※ 1700V/400A品において、 $f_c=10\text{kHz}$ の場合)

表1 SiCハイブリッドモジュールの系列

用途	構成	パッケージ
400VAC系	1200V耐圧SiC-SBD+ Si-IGBT	2in1
690VAC系	1700V耐圧SiC-SBD+ Si-IGBT	2in1
電鉄用途	3300V耐圧SiC-SBD+ Si-IGBT	1in1

2.2 特性改善

2.2.1 FWDの順方向特性

図1-1にSiCハイブリッドモジュールとSiモジュールのFWD順方向特性を、図1-2に温度依存性の一例を示します。ジャンクション温度が125°Cで定格電流400AのときのSiCハイブリッドモジュールの順方向電圧 V_F は、Siモジュールの V_F と同等です。SiCハイブリッドモジュールは、強い正の温度特性を持ったSiC-SBDを搭載しているので、多並列接続使用した場合でも電流アンバランスが起きにくくなります。

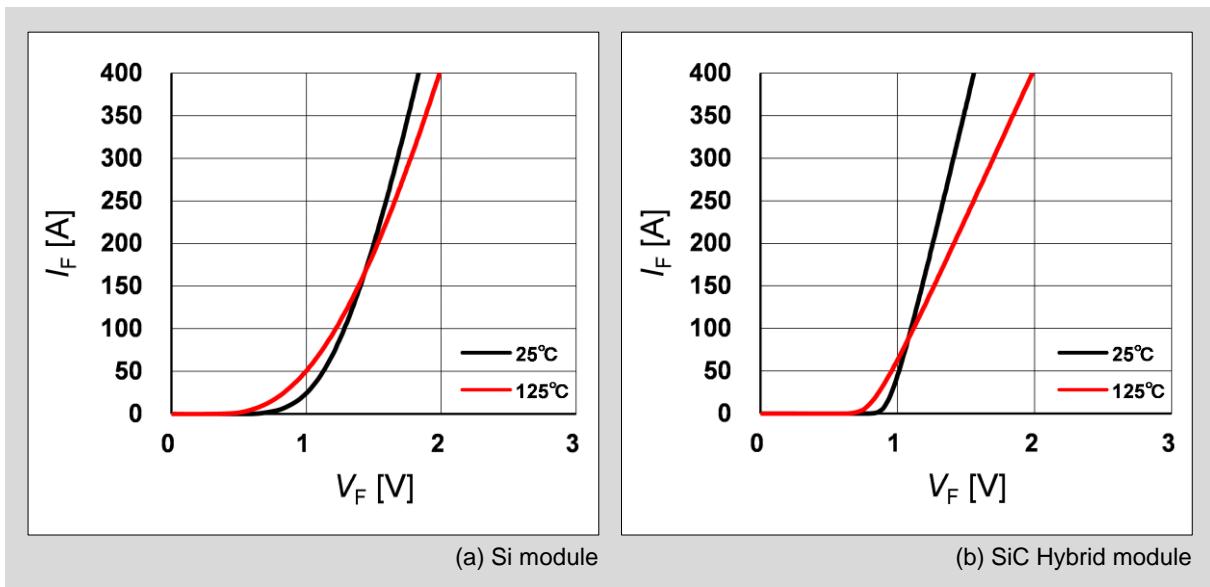


図1-1 FWDの順方向特性(1700V/400A)

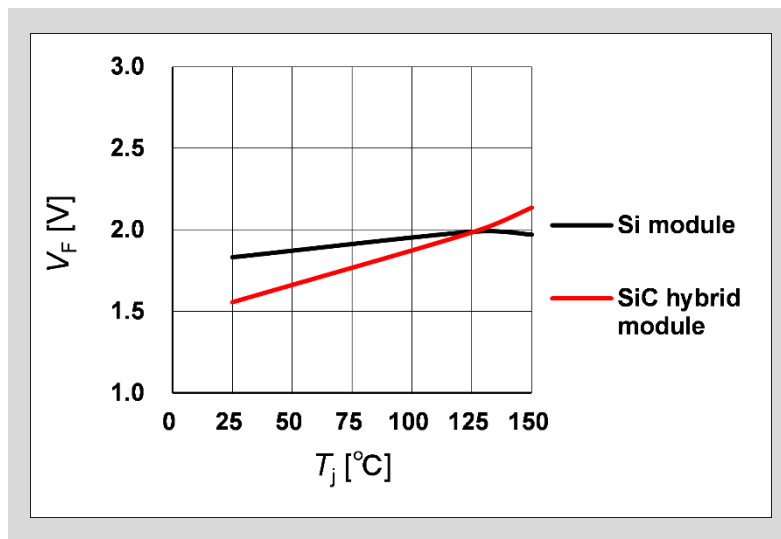


図1-2 FWDの温度特性(1700V/400A)

注) SiC-SBDは、温度上昇で V_F が上昇する強い正の温度特性を持ち、さらに大電流時の V_F が高いという特徴があります。突入電流がある回路に適用する場合は、発生損失、温度上昇を十分考慮して下さい。

2.2.2 漏れ電流特性

図1-3にSiCハイブリッドモジュールとSiモジュールの漏れ電流温度依存性を示します。25°Cの定格電圧印加におけるSiCハイブリッドモジュールの漏れ電流 I_{CES} は、Siモジュールの漏れ電流に対し数千倍程度大きい値を示しますが、125°CではSiモジュールに対し2倍程度の値まで下がります。SiC-SBDの漏れ電流の温度依存性は、Si-PNダイオードに比べて小さくなります。したがって、SiCハイブリッドモジュールは、Siモジュールと同様に高温動作が可能です。これは、SiCのバンドギャップがSiの約3倍と広く、SiC-SBDはSi-PNダイオードに比べて高電界で動作することにより、SiC-SBDの漏れ電流成分はトンネル電流が支配的となり、温度の影響を受けにくいことによります。

Siモジュールに用いられているSi-PNダイオードと、SiCハイブリッドモジュールに用いられているSiC-SBDでは、漏れ電流のメカニズムが異なるため、温度依存性、電圧依存性に大きな違いがあります。特に、高温、高電圧印加が継続する使用方法の場合は、漏れ電流による発生損失、温度上昇を十分考慮することを推奨します。

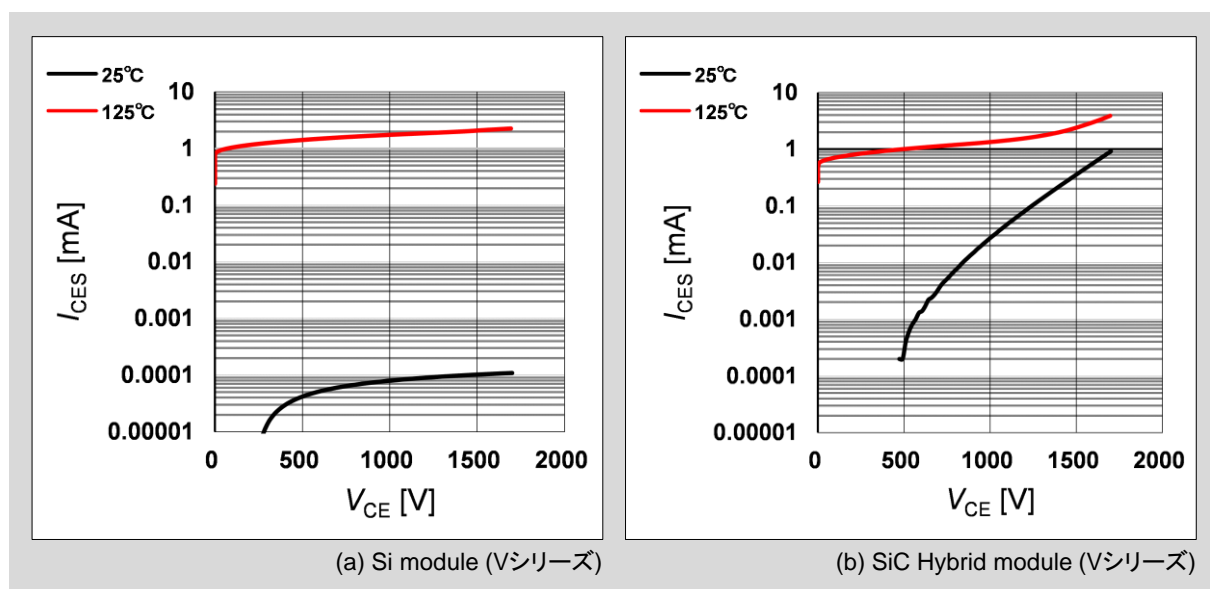


図1-3 漏れ電流温度特性(1700V/400A)

2.2.3 スイッチング特性

(1) 逆回復特性

オン期間中の蓄積電荷がなく非常に高速な逆回復動作が期待できます。

(2) ターンオン損失特性

図1-4に、SiCハイブリッドモジュールとSiモジュールのターンオン損失特性を示します。SiC-SBDの容量充電電流は対向アーム側のIGBTターンオン電流に影響し、ターンオン損失の低減に繋がります。

1700V/400A品のターンオン損失は、Siデバイスと比べて約40%低くなります。

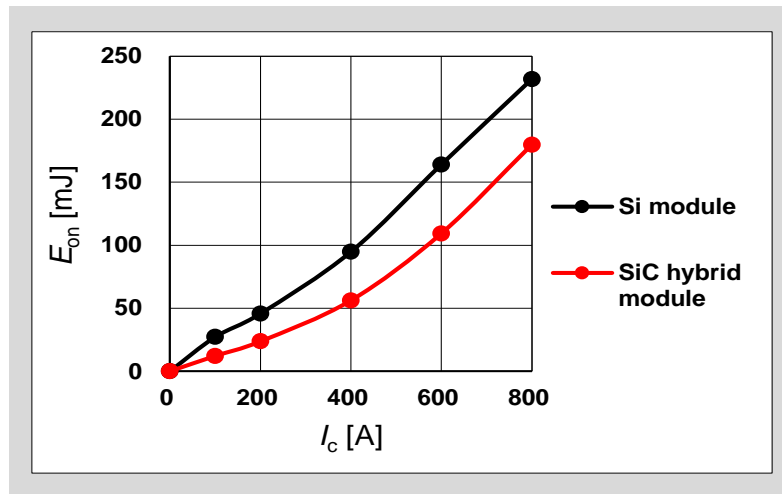


図1-4 ターンオン損失特性(1700V/400A)

(3) ターンオフ損失特性

図1-5に、SiCハイブリッドモジュールとSiモジュールのターンオフ損失特性を示します。SiCハイブリッドモジュールのターンオフ時のサージピーク電圧は、式(1)で表すことができます。IGBTの素子特性と主回路のインダクタンスが同等であれば、ダイオードの過渡オン電圧の差がサージ電圧の差となります。SiC-SBDはSi-PNダイオードと比較してドリフト層が非常に低抵抗のため、過渡オン電圧が低減されます。従って、ターンオフ時のサージ電圧が低く抑えられ、ターンオフ損失も低くなります。

$$V_{SP} = V_{CC} + L_S \frac{dI_c}{dt} + V_{FR} \quad \dots\dots\dots (1)$$

V_{SP} : サージピーク電圧, V_{CC} : 印加電圧, L_S : 主回路インダクタンス
 I_c : コレクタ電流, V_{FR} : 過渡オン電圧

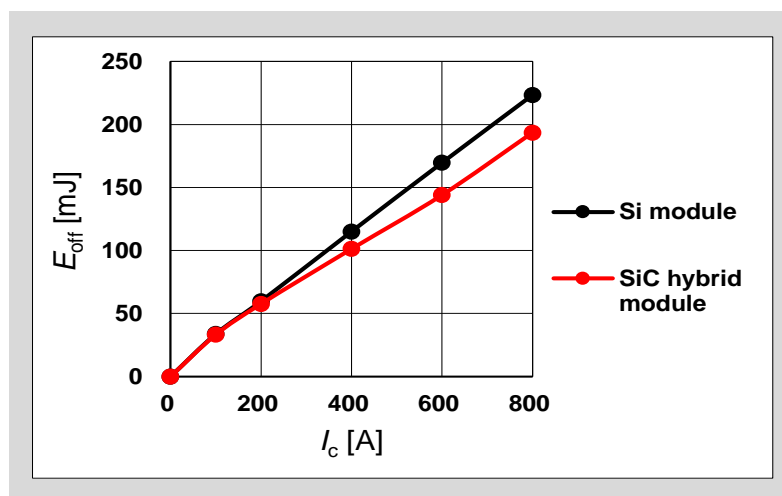


図1-5 ターンオフ損失特性(1700V/400A)

3. SiCハイブリッドモジュールのスイッチング定義

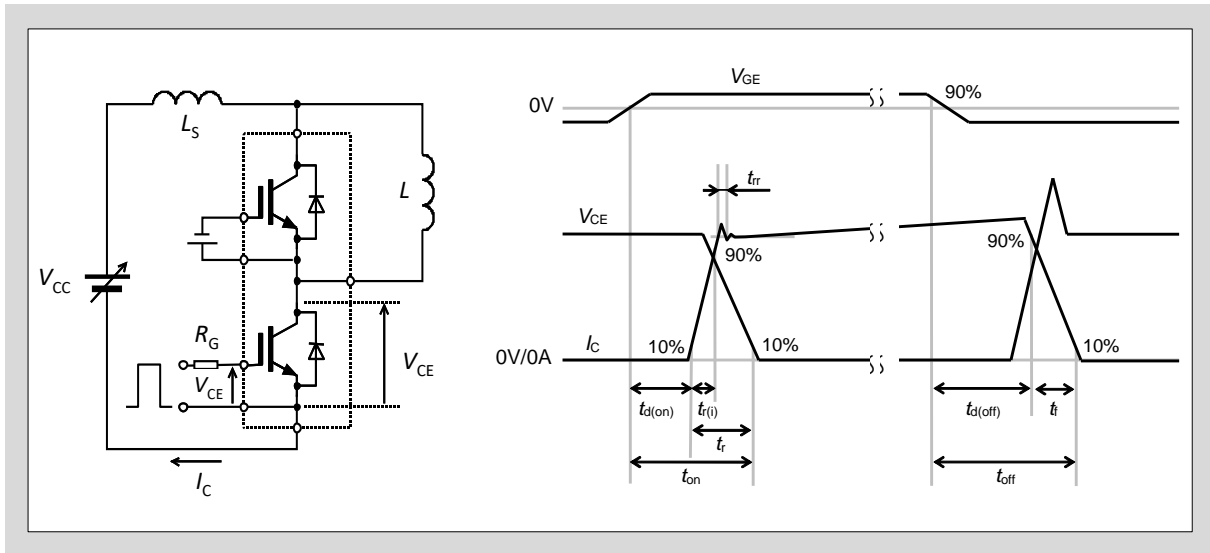


図1-6 SiCハイブリッドモジュールのスイッチング定義