

---

---

# SiC ハイブリッドモジュール アプリケーションノート

## 第 1 章

### - 基本コンセプトと特徴 -

---

---

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

#### はじめに

---

---

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、600V～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、IGBT 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 CO<sub>2</sub> 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。200VAC 系用の 600V 耐圧 SiC-SBD や 400VAC 系用 1200V 耐圧 SiC-SBD を使った 2in1/6in1/PIM、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
200VAC 系	600V 耐圧 SiC-SBD+ Si-IGBT	6in1/PIM
400VAC 系	1200V 耐圧 SiC-SBD+ Si-IGBT	2in1/6in1/PIM
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 2-1 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 2-2 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 を搭載しているため、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。

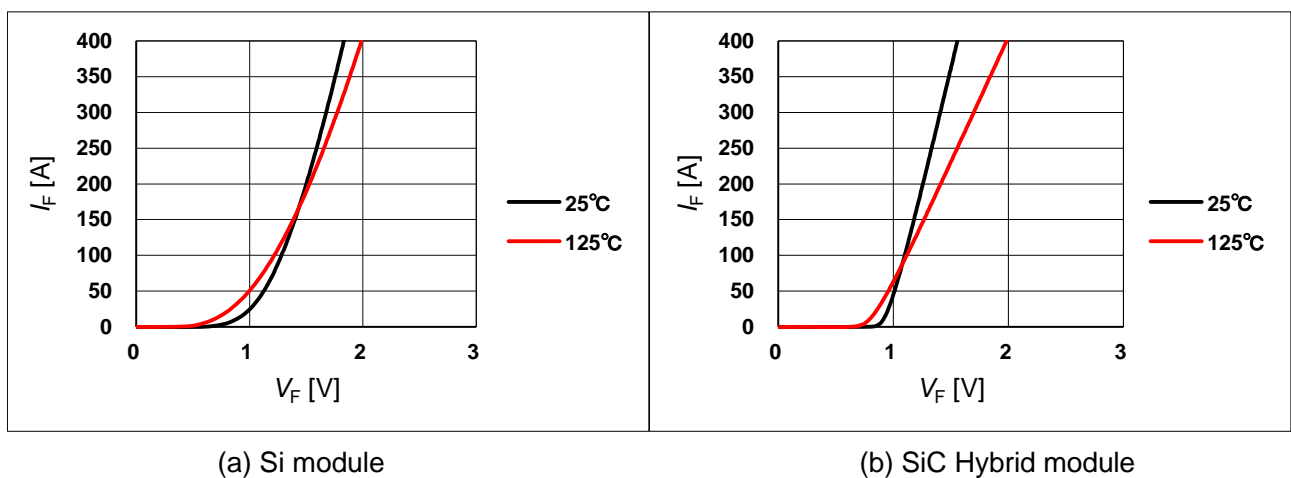


図 2-1 FWD の順方向特性 (1700V/400A)

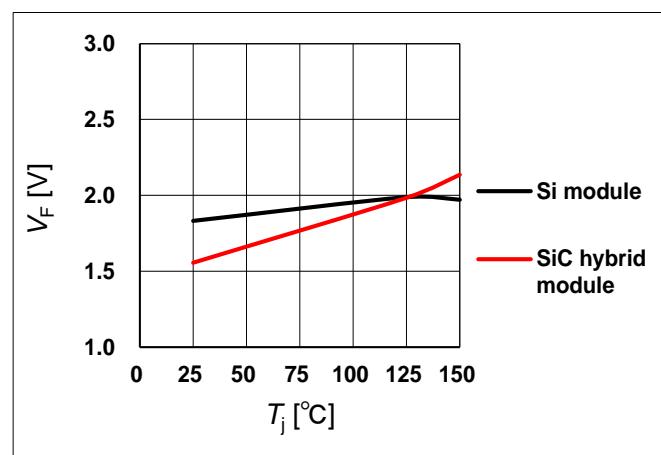


図 2-2 FWD の温度依存性 (1700V/400A)

## 2.2.2 漏れ電流特性

図 2-3 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℃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、150℃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-FWD 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-FWD 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。

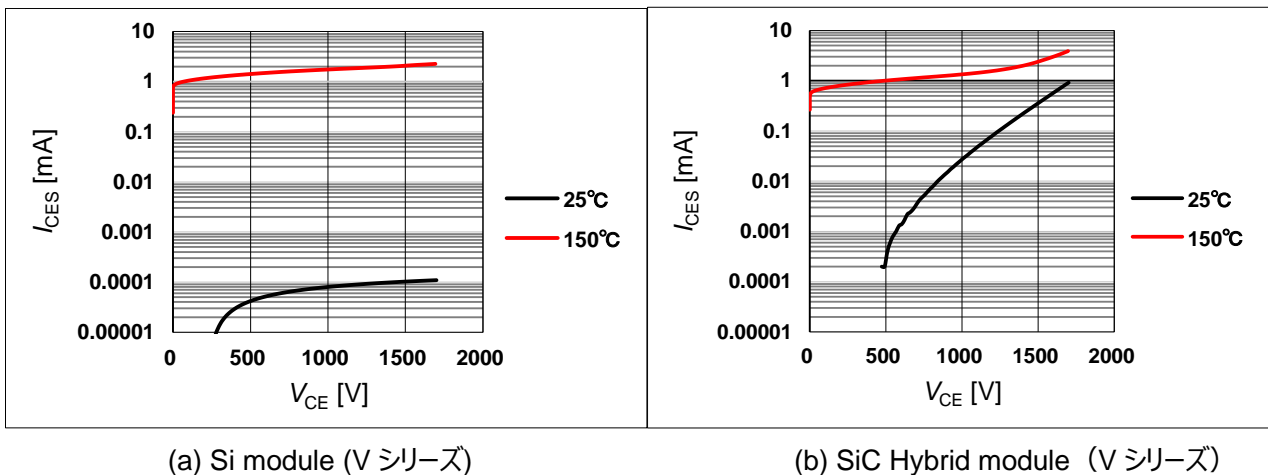


図 2-3 漏れ電流温度依存性 (1700V/400A)

## 2.2.3 スイッチング特性

### (1) 逆回復特性

SiC ハイブリッドモジュールに使われる SiC-SBD は、ユニポーラデバイスのため、逆回復動作はありません。(実際は接合容量の影響で、僅かな電流が流れますが、pin ダイオードと比べて損失は遥かに小さい。)

### (2) ターンオン損失特性

図 2-4 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。

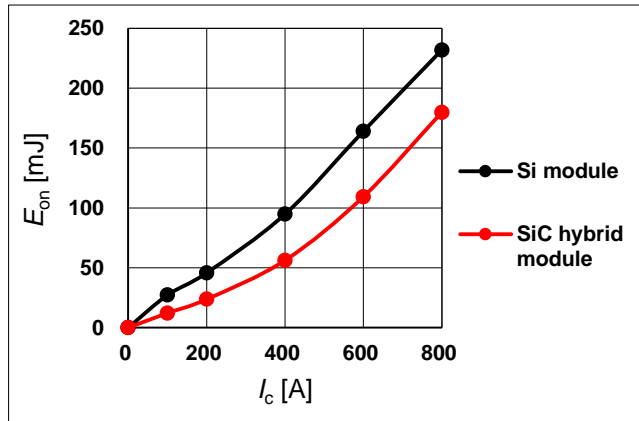


図 2-4 ターンオン損失特性 (1700V/400A)

(3) ターンオフ損失特性

図 2-5 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-FWD 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。

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

- $V_{SP}$  : 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

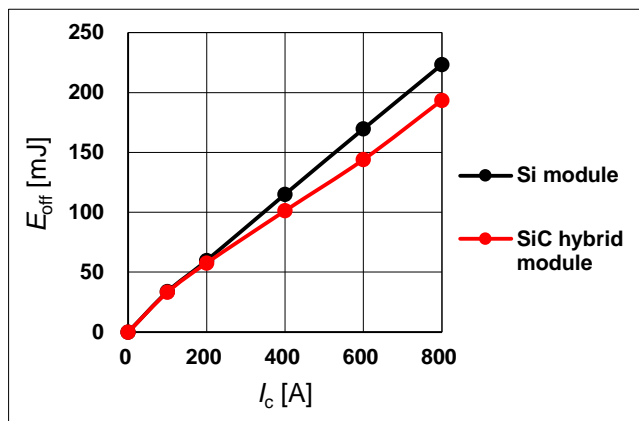


図 2-5 ターンオフ損失特性 (1700V/400A)

### 3 SiC ハイブリッドモジュールのスイッチング定義

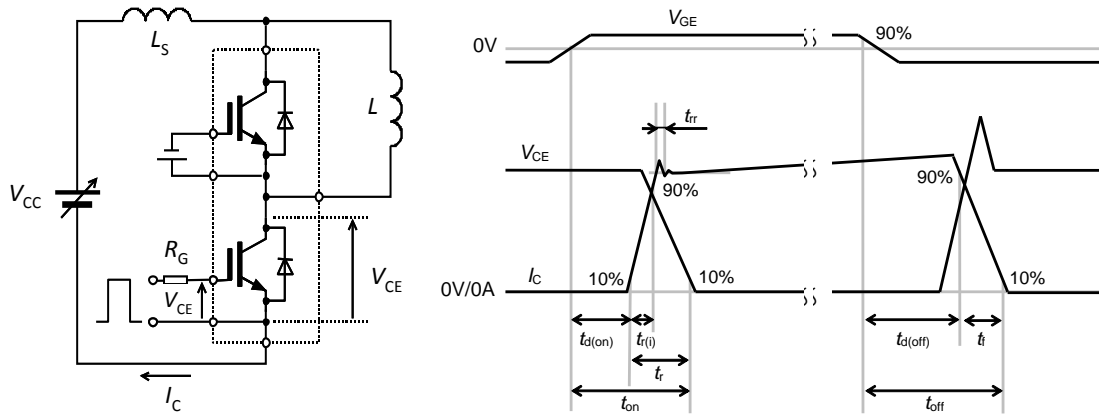


図 3-1 SiC ハイブリッドモジュールのスイッチング定義