

1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

1,700-V Withstand Voltage SiC Hybrid Module

小根澤 巧 ONEZAWA, Takumi

北村 祥司 KITAMURA, Shoji

磯 亜紀良 ISO, Akira

省エネルギーに貢献するインバータ用のパワーデバイスとして、電気鉄道市場に向けた 1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールを開発した。IGBT には第 6 世代の IGBT チップを搭載し、FWD には SiC-SBD チップを搭載した。製品定格は、1,700 V/1,200 A (2 in 1) であり、損失を重視した標準仕様と低スイッチング周波数に適した低 $V_{CE(sat)}$ 仕様との 2 系列を持つ。標準仕様は、従来の Si モジュールに対して発生損失の 18% 低減を実現した。また、インバータにおける発生損失の比較において、低 $V_{CE(sat)}$ 仕様は、低スイッチング周波数の条件において標準仕様に対して 6% の低減を実現した。

Fuji Electric has developed a SiC hybrid module with a 1,700-V withstand voltage. It is designed for use in the traction market as a power device that can be utilized in inverters that contribute to energy savings. This module is equipped with 6th-generation IGBT chips and applies SiC-SBD chips to its FWDs. It has a product rating of 1,700 V/1,200 A (2 in 1) and has 2 specifications: standard specifications that make much of power dissipation, and low $V_{CE(sat)}$ specifications suitable for low switching frequencies. The standard specifications reduce loss by 18% compared with conventional Si modules. Furthermore, the low $V_{CE(sat)}$ specifications achieve 6% loss reduction compared with the standard specifications at low switching frequency condition.

① まえがき

近年、地球温暖化の進行を抑制するため、CO₂ をはじめとした温室効果ガスの排出量の低減が求められている。電力変換機器をはじめとするパワーエレクトロニクス機器に対してもその要求は例外ではなく、温室効果ガスの排出量をいっそう削減するために、さらなる省エネルギー（省エネ）を行う必要がある。電力変換機器は、電気鉄道をはじめとする社会インフラ向けやエアコンなどの消費者向けなど、社会生活全体に入り込んでおり、省エネ化による温室効果ガス削減への寄与が大きい。この電力変換機器に搭載されているインバータの省エネ化は、パワーデバイス、回路、制御などの構成要素の技術革新によって実現できる。パワーデバイスでは、さらなる低損失化を達成し続けていくことが重要な使命である。

現在、主流のパワーデバイスは Si（シリコン）の IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）と FWD（Free Wheeling Diode）のチップを用いた IGBT モジュールである。しかし、Si デバイスの性能は、物性に基づく理論的限界に近づきつつあり、今後、大幅な低損失化が期待できない。高耐熱性と高破壊電界耐量の特徴を持った SiC（炭化けい素）デバイスにより、Si デバイスでは実現困難な飛躍的な低損失化が可能になり、インバータ装置の高効率化や小型化が実現できる。

富士電機では、開発した 600 V、1,200 V、1,700 V 耐圧の SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）チップと Si-IGBT チップとを組み合わせ搭載した SiC ハイブリッドモジュールを製品化している。中でも電気鉄道の主電源向けの 1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの製品開発に注力し、系列の拡大を図っている。この用途では、高耐圧、大容量化が必要不可欠であり、これまでに培ってきた大容

量 IGBT モジュール技術を継承した SiC ハイブリッドモジュールを開発している^{(1)~(4)}。

本稿では、1,700 V/1,200 A (2 in 1) 定格の SiC ハイブリッドモジュールについて述べる。

② 概要

図 1 に、1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの外観を示す。ベース材料に AlSiC（アルミニウムと炭化けい素の複合材料）を、絶縁基板材料に高熱伝導率の AlN（窒化アルミニウム）を使用した高信頼性パッケージである。AlSiC は、線膨張係数が $7.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり AlN 基板の $4.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ に近いため、Cu（銅）ベースに比べてヒートサイクル寿命や、パワーサイクル寿命が向上する。

図 2 に等価回路を示す。IGBT には第 6 世代の IGBT チップを搭載し、FWD には 1,700 V 耐圧の SiC-SBD チップを搭載した。

電気鉄道向けでは、キャリア周波数が約 0.5 kHz 以下という低いスイッチング周波数における運転が多く、定常

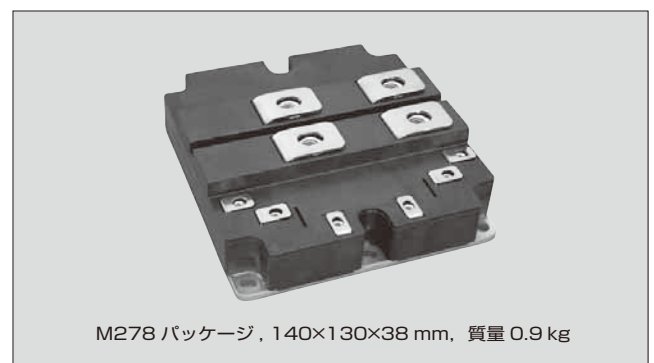


図 1 1,700 V耐圧SiCハイブリッドモジュール

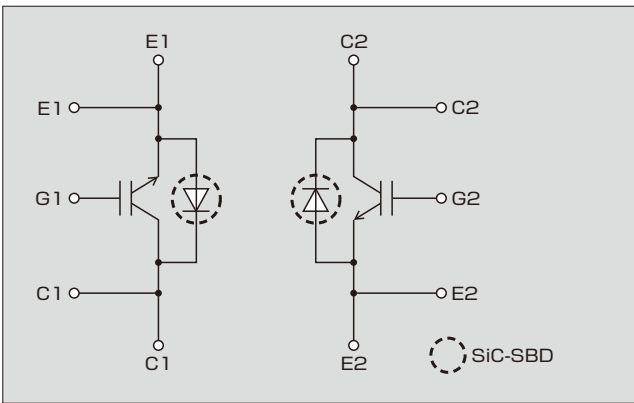


図2 1,700V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの等価回路

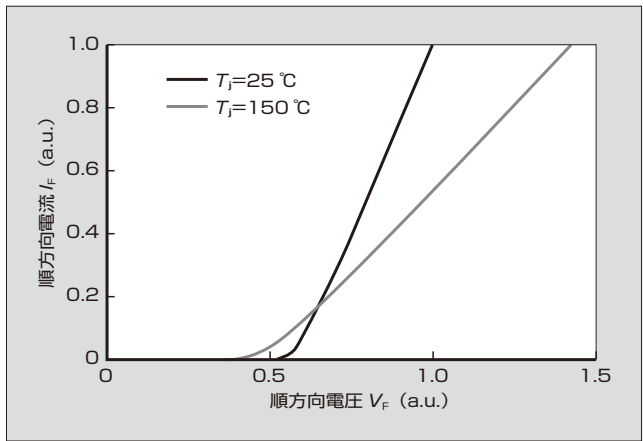


図3 $V_F - I_F$ 特性

損失が支配的である。したがって、低い飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ 特性が望ましい。また、大容量インバータの主回路では、小・中容量のものに比べて主回路インダクタンス L_s が大きくなる。式(1)で示すように、 L_s とターンオフ電流の傾き di/dt の影響によって発生するターンオフサージ電圧 V_{sp} が大きくなるため、 V_{sp} が低いものが望ましい。しかし、この V_{sp} を抑制するため、ターンオフ速度を遅くすると、損失が増大するという問題がある。このような観点から、低 $V_{CE(sat)}$ と低 V_{sp} という要求を満足するため、スイッチング損失を重視した標準仕様に加えて、定常損失と V_{sp} を重視した低 $V_{CE(sat)}$ 仕様を系列に加えている。搭載する IGBT のチップの厚さを最適化することで、 $E_{off} - V_{CE(sat)}$ のトレードオフを改善し、コレクタからのキャリア注入量を調整することによってトータル損失の最小化を実現した。

$$V_{sp} = V_{cc} + L_s \frac{di_c}{dt} \dots\dots\dots(1)$$

- V_{sp} : ターンオフサージ電圧 (V)
- V_{cc} : 回路電圧 (V)
- L_s : 主回路インダクタンス (H)
- I_c : コレクタ電流 (A)

3 特性

3.1 標準仕様の 1,700V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

(1) FWD の出力特性

今回、SiC ハイブリッドモジュールに搭載した 1,700V 耐圧の SiC-SBD の順方向電圧 V_F - 順方向電流 I_F 特性を図 3 に示す。並列に接続されたチップの一つに他のチップよりも大きな電流が流れようとするとき SiC-SBD の強い正の温度特性によって抵抗が増加し、電流の増加を抑制するよう自己調整を行うので、電流の不均衡は発生しにくくなる。そのため、チップの並列接続が多い大容量 IGBT モジュールにおいて、有効な特性である。

(2) スwitching 特性

図 4 に、SiC ハイブリッドモジュールと Si モジュールの逆回復波形の比較を示す。SiC ハイブリッドモジュールでは、逆回復電流のピーク値 I_{rp} が大幅に下がる。これは

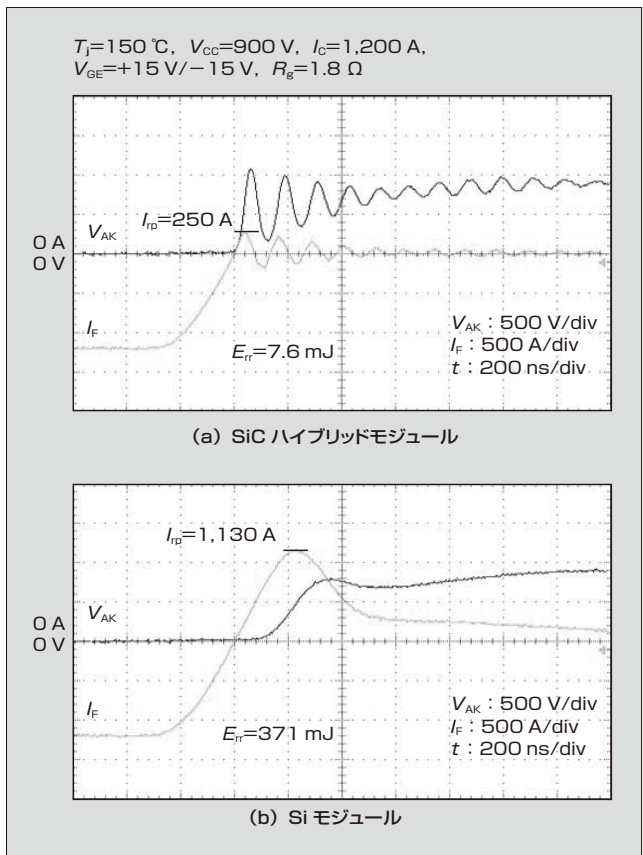


図4 逆回復波形

SiC-SBD がユニポーラデバイスであり、少数キャリアの注入と掃出しが起きないことによる。図 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ン波形の比較を示す。SiC ハイブリッドモジュールは、前述のように逆回復電流を大幅に削減できるため、それを反映したターンオン電流のピーク値 I_{cp} も大幅に低減できる。

このように、Si モジュールでは、 E_{rr} が 371mJ であるのに対し、SiC ハイブリッドモジュールでは 7.6mJ となり、約 98% 低減した。さらに、 E_{on} は Si モジュールで 585mJ であるのに対し、SiC ハイブリッドモジュールで 315mJ となり、約 46% 低減した。

(3) インバータにおけるモジュールの発生損失

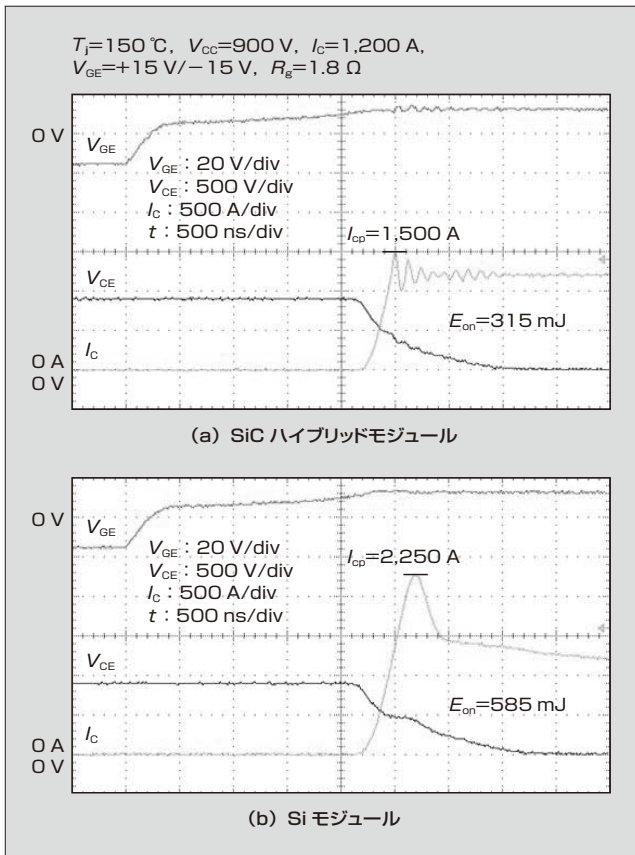


図5 ターンオン波形

図6に、インバータにおける発生損失のシミュレーション結果を示す。SiCハイブリッドモジュールの発生損失は、Siモジュールと比較してキャリア周波数が0.3kHz、1kHz、3kHzのとき、それぞれ5%、18%、32%低減できることが分かる。このように、キャリア周波数を高くすることで、損失低減率が大きくなることから、高周波動作においてSiCハイブリッドモジュールの適用が期待できる。

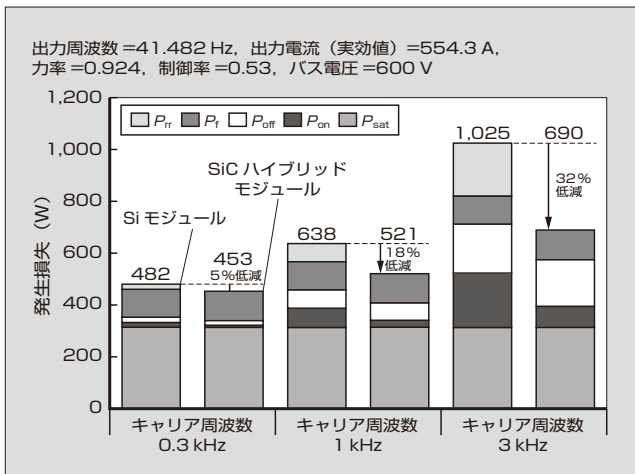


図6 インバータにおける発生損失のシミュレーション

3.2 低 $V_{CE(sat)}$ 仕様の 1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

(1) IGBT の出力特性

図7に $V_{CE(sat)} - I_C$ 特性を示す。標準仕様と低 $V_{CE(sat)}$ 仕様は、共に正の温度特性を持つため、電流の不均衡は発生しにくくなり、容易に並列接続ができる。また、低 $V_{CE(sat)}$ 仕様では、標準仕様に対して $T_j=25^\circ\text{C}$ で 0.20 V、 $T_j=150^\circ\text{C}$ で 0.22 V 低減している。

(2) スイッチング特性

図8にターンオフ波形の比較を示す。標準仕様では V_{sp} が 1,420 V であるのに対し、低 $V_{CE(sat)}$ 仕様では 1,260 V と

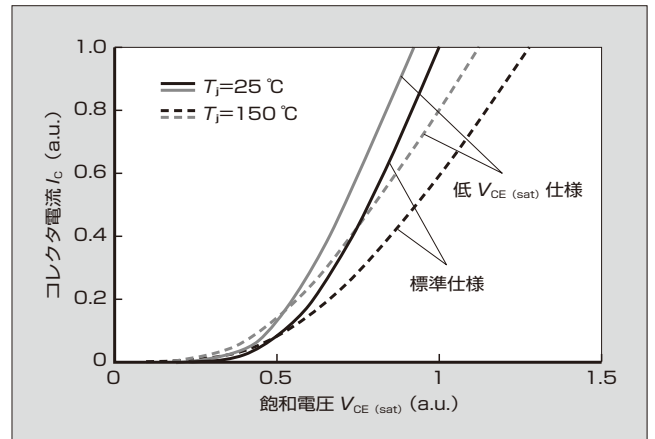


図7 $V_{CE(sat)} - I_C$ 特性

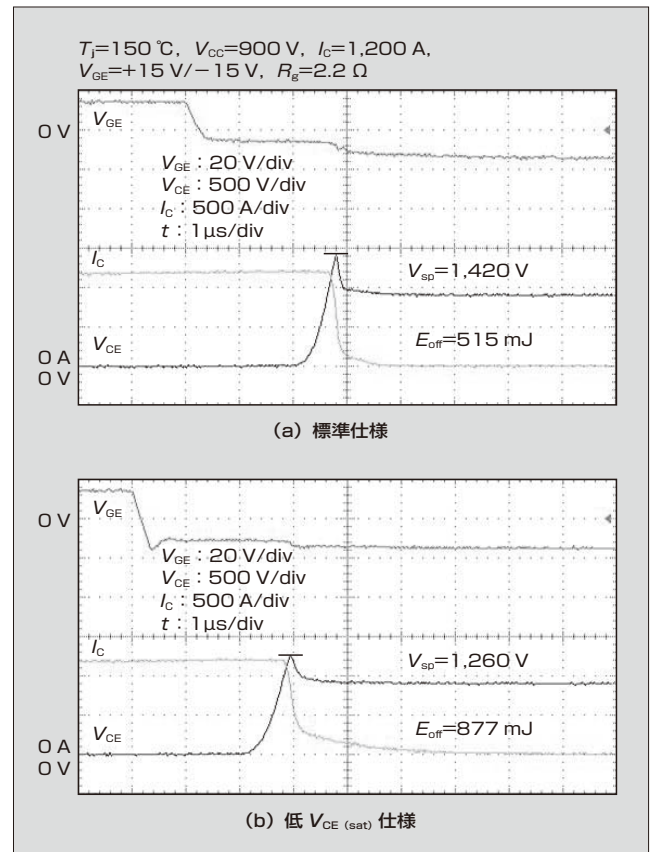


図8 ターンオフ波形

なり 160V 低減した。図 9 に $V_{sp}-I_C$ 特性を示す。定格電流 1,200A で約 10% 低減することが分かる。図 10 にターンオフ損失 $E_{off}-I_C$ 特性を示す。低 $V_{CE(sat)}$ 仕様の E_{off} は、標準仕様と比較して定格電流で約 70% 増大することが分かる。これは、低 $V_{CE(sat)}$ 仕様ではサージ電圧を抑制するために、コレクタ側からのキャリア注入量を最適化することにより、テール電流が大きくなっているためである。

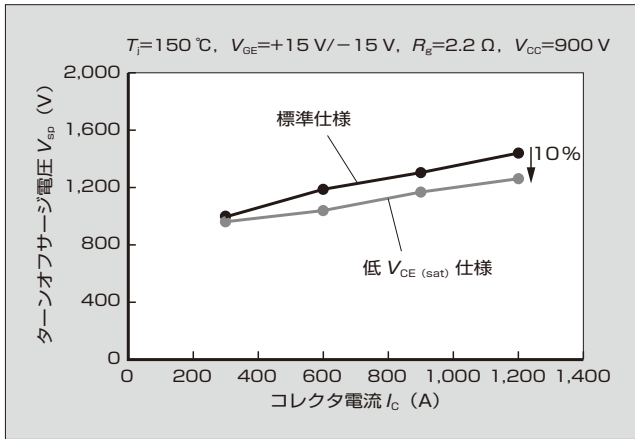


図 9 $V_{sp} - I_C$ 特性

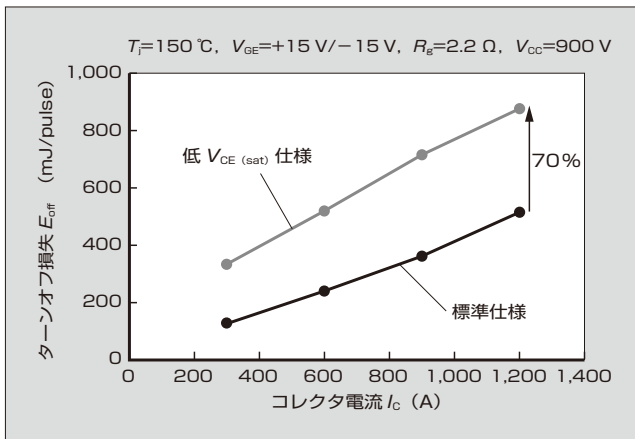


図 10 $E_{off} - I_C$ 特性

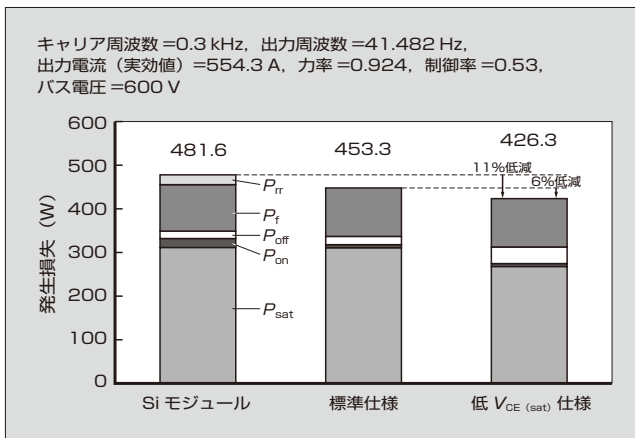


図 11 インバータにおける発生損失のシミュレーション結果

(3) インバータにおけるモジュールの発生損失

図 11 に、インバータにおける発生損失のシミュレーション結果を示す。キャリア周波数が 0.3kHz のとき、低 $V_{CE(sat)}$ 仕様の P_{off} は増大するものの、発生損失は Si モジュールに対して 11%、標準仕様に対して 6% 低減する。このように、低 $V_{CE(sat)}$ 仕様は、キャリア周波数が小さい領域において、 V_{sp} の低減とともに標準仕様よりも発生損失を低減できる。

4 あとがき

本稿では、1,700V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールについて述べた。本製品は、デバイス自身の大幅な損失低減により、インバータの高効率・小型化に大きく貢献できると考える。今後、さらなる SiC ハイブリッドモジュールの系列化を推進するとともに、IGBT の代わりに SiC-MOSFET のチップを、FWD の代わりに SiC-SBD のチップを搭載した All-SiC モジュールの系列化を推進し、省エネルギー化に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 木下明将ほか。“高温での V_T を特徴とした 600V/1,200V クラス SiC-SBD”。つくば市。2010-10-21。応用物理学会 SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会第 19 回公演。
- (2) 中沢将剛ほか。Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュール。富士時報。2011, vol.84, no.5, p.331-335。
- (3) 小林邦雄ほか。1,700V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール。富士電機技報。2013, vol.86, no.4, p.240-243。
- (4) 小林邦雄ほか。1,200V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール。富士電機技報。2014, vol.87, no.4, p.240-243。



小根澤 巧

IGBT モジュールの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部モジュール技術部。



北村 祥司

半導体デバイスの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部デバイス開発部。



磯 亜紀良

IGBT モジュール開発のパッケージ設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部モジュール技術部チームリーダー。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。