

SiC-PiN ダイオードとSi-IEGTのハイブリッドペアによる高周波駆動大電力変換装置

High-Power Converters with High Switching Frequency Using Hybrid Pairs of SiC-PiN Diodes and Si-IEGTs

高尾 和人 四戸 孝 金井 丈雄

■ TAKAO Kazuto ■ SHINOHE Takashi ■ KANAI Takeo

電力、産業、鉄道交通分野などの社会インフラを支えるMVA級電力変換装置の主要部品である高電圧大電力パワーデバイスでは、高性能化のため高耐圧の炭化ケイ素 (SiC) パワーデバイスの適用が期待されている。

東芝グループは、高耐圧SiC-PiNダイオードとSi (シリコン)-IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) を組み合わせた大電力ハイブリッドペア モジュールの研究開発を行ってきた。今回、4.5 kV-400 A級のハイブリッドペア モジュールを開発し、従来比で50%のスイッチング損失低減効果と、4 kHzの高周波スイッチング動作を実証した。大電力ハイブリッドペア モジュールの適用によって、社会インフラ用電力変換装置の小型、軽量、及び高効率化が期待される。

High-power semiconductor devices are key devices for MVA-class power converters supporting various social infrastructures, including power systems, industrial systems, and railway systems. In particular, high-voltage silicon carbide (SiC) power devices are expected to improve the characteristics of high-power semiconductor devices.

The Toshiba Group has been engaged in research and development aimed at realizing a high-power hybrid pair module using high-voltage SiC p-intrinsic-n (SiC-PiN) diodes and Si injection enhanced gate transistors (Si-IEGTs). We have now developed a 4.5 kV-400 A-class hybrid pair module, and demonstrated a 50% switching loss reduction compared with conventional modules and 4 kHz high switching frequency operation. The high-power hybrid pair module can contribute to the realization of high-efficiency MVA-class power converters with smaller size and lighter weight in the social infrastructure field.

1 まえがき

大電力パワーデバイスを適用した電力変換技術は電力分野、産業分野、鉄道分野などの社会インフラを支える重要な技術である⁽¹⁾。低炭素社会の実現に向けて、スマートグリッド、太陽光発電、風力発電、高速鉄道などの分野で国内だけでなく世界的にも今後大電力変換装置の需要が大きく伸びると予想されている。

大電力変換装置の普及のためには、小型・軽量化が重要な課題の一つである。外形と質量を決定する要素として、受動部品であるトランスとフィルタが挙げられる。これらを小型化するために、変換装置のスイッチング周波数の高周波化が求められている。しかし、現状の大電力パワーデバイスでは電力損失に制約があるため、1 kHz以上の高周波駆動は困難であった。

今回東芝グループは、他機関との共同研究によって高耐圧SiC-PiNダイオード⁽²⁾とSi-IEGT⁽³⁾を組み合わせた定格4.5 kV-400 A級のハイブリッドペア モジュールを開発し、電力損失の低減と4 kHzの高周波駆動を実証した⁽⁴⁾。ここでは、開発した高耐圧ハイブリッドペア モジュールの概要と特長、及びMVA級の大電力変換装置を想定したプロトタイプ変換装置による動作実証試験の結果について述べる。

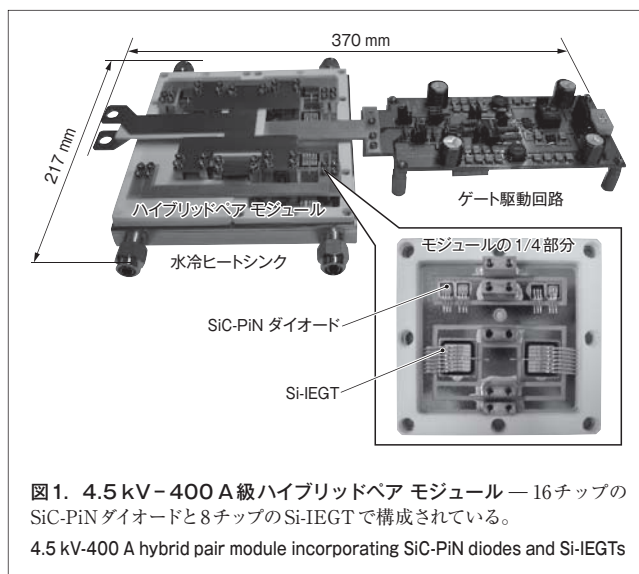


図1. 4.5 kV-400 A級ハイブリッドペア モジュール—16チップのSiC-PiNダイオードと8チップのSi-IEGTで構成されている。
4.5 kV-400 A hybrid pair module incorporating SiC-PiN diodes and Si-IEGTs

2 4.5 kV-400 A級ハイブリッドペア モジュール

開発した4.5 kV-400 A級ハイブリッドペア モジュールを図1に示す。モジュールには、16チップのSiC-PiNダイオードと8チップのSi-IEGTを用いている。SiC-PiNダイオードは、独立行政法人産業技術総合研究所で試作されたものである。

ハイブリッドペア モジュールでは、パワーデバイスチップの熱抵抗を低減させるため、SiC-PiN ダイオードと Si-IEGT チップが搭載されたセラミックス回路基板を水冷ヒートシンク（放熱板）に直接はんだ付けする構造とした。また、Si-IEGT を高速スイッチングさせるため、モジュールとゲート回路の接続は各 Si-IEGT チップとゲート回路間の配線距離が等価になるような配線パターンのプリント基板配線で接続した⁽⁵⁾。

ハイブリッドペア モジュールに用いた SiC-PiN ダイオードの順方向電流-順方向電圧 (I/V) 特性を **図2** に示す。SiC はワイドバンドギャップ半導体であり、PN 接合のビルトイン電圧が Si より高い。そのため、順方向電圧が約 2.5 V に到達して電流が流れ始める。素子温度 150 °C、順方向電流密度 200 A/cm² の条件で、順方向電圧は 3.48 V である。

チップ単体での SiC-PiN ダイオードと Si-PiN ダイオードの逆回復特性の比較を **図3** に示す。Si-PiN ダイオードでは逆回復

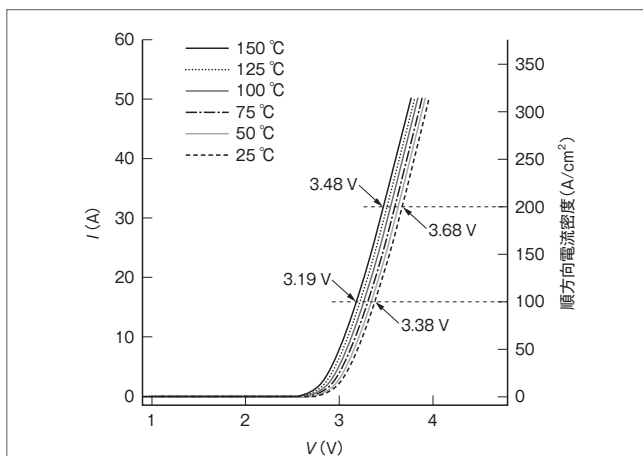


図2. SiC-PiN ダイオードの I/V 特性 — 素子温度 150 °C、順方向電流密度 200 A/cm² の条件で、順方向電圧は 3.48 V である。
Current-voltage characteristics of SiC-PiN diode

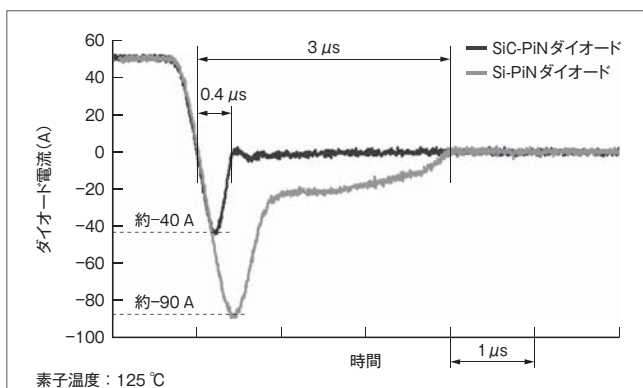


図3. SiC-PiN ダイオードと Si-PiN ダイオードの逆回復特性の比較 — Si-PiN ダイオードの逆回復電流のピーク値は約 -90 A であるのに対し、SiC-PiN ダイオードは約 -40 A であり、1/2 以下に抑えられる。
Comparison of reverse recovery characteristics of SiC-PiN and Si-PiN diodes

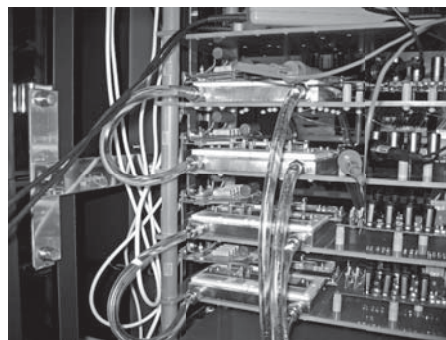
電流のピーク値が約 -90 A であるのに対し、SiC-PiN ダイオードでは約 -40 A と 1/2 以下に抑えられている。逆回復時間は、Si-PiN ダイオードが 3 μs であるのに対し、SiC-PiN ダイオードでは、0.4 μs と 1/7 以下であり、非常に高速で動作することがわかる。

3 プロトタイプ変換装置による高周波スイッチング動作の実証

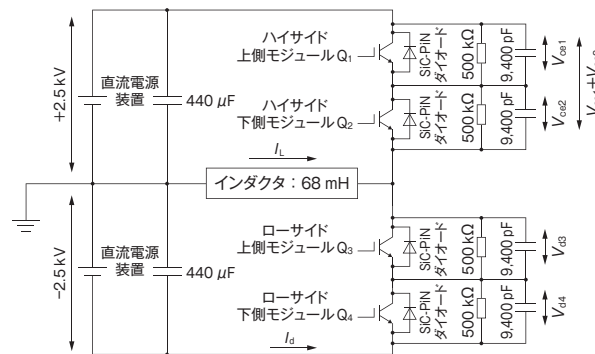
3.1 プロトタイプ変換装置の概要

ハイブリッドペア モジュールを適用したプロトタイプ変換装置とその等価回路を **図4** に示す。今回製作したプロトタイプ変換装置はハーフブリッジ回路の構成であり、フルブリッジインバータ回路の 1 相分に相当する。

MVA 級の大電力変換装置では、パワーデバイスを多直列化して大容量装置を構成する場合が多い。そこで今回のプロ



(a) プロトタイプ変換装置



(b) 等価回路

- $Q_1 \sim Q_4$: 4.5 kV-400 A 級ハイブリッドペア モジュール
- V_{cs1}, V_{cs2} : モジュール単体の Si-IEGT のコレクター-エミッタ間電圧
- $V_{cs1} + V_{cs2}$: モジュール 2 直列分の Si-IEGT のコレクター-エミッタ間電圧
- V_{cs} : ローサイドの上側 SiC-PiN ダイオードの電圧
- V_{d1} : ローサイドの下側 SiC-PiN ダイオードの電圧
- V_{d2} : 負荷電圧
- I_L : 負荷電流
- I_d : SiC-PiN ダイオードの電流

図4. ハイブリッドペア モジュールを適用したプロトタイプ変換装置と等価回路 — ハイブリッドペア モジュールを 2 直列に接続して直列動作特性を評価した。

Prototype power converter using 4.5 kV-400 A hybrid pair modules

トタイプ変換装置では、ハイブリッドペア モジュールを2直列接続構成とし、直列動作特性を評価した。

Si-IEGTのスイッチングでは、コレクタ-エミッタ間電圧が変化するときゲート-エミッタ間電圧が一定になる期間(ミラー期間と呼ばれる)が存在し、その期間に直列モジュール間で電圧分担がアンバランスになるという問題がある。直列電圧分担を改善する方法として、コレクタ-エミッタ間電圧の状態を検出してゲート-エミッタ間電圧を制御するアクティブゲートドライブという方法がある。しかしこの方法では、スイッチング時間が長くなりスイッチング損失が大きいことが問題である。

これに対し、ゲート抵抗値を小さくしてミラー期間を極限まで短くすることで電圧アンバランスが発生する前にスイッチング動作を完了させる、ハードドライブという方法が提案されている⁽⁵⁾。この方法は、スイッチング時間が短いためスイッチング損失を小さくすることができる。しかし、従来のSi-PiNダイオードでは図3に示したように逆回復電流が大きいため、ダイオードの損失増大や過電圧が発生し実用化が困難であった。

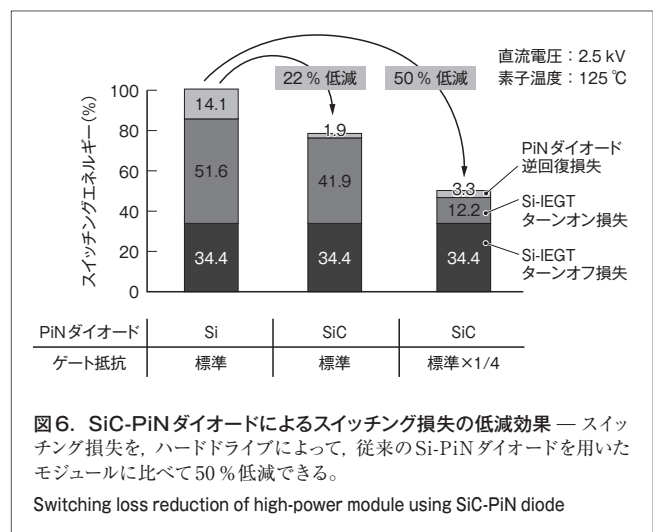
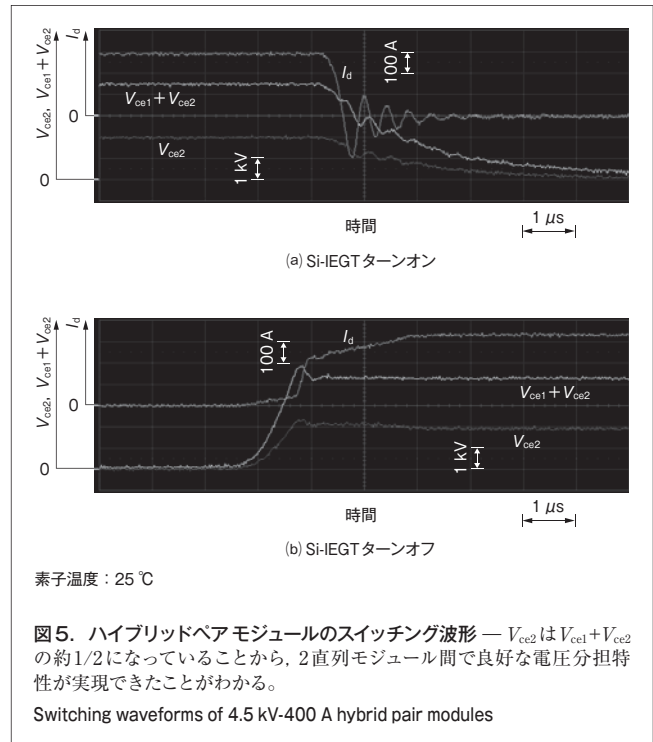
一方、SiC-PiNダイオードは逆回復電流が小さいので、ハードドライブを適用できる。そこで、今回製作したプロトタイプ変換装置では、ハードドライブによるモジュールの直列動作を検証した。ハードドライブでは、直列電圧バランスを安定化させるための付加部品として、直流電圧バランス用の抵抗とスイッチング時の電圧バランス用の小容量コンデンサをモジュールに並列接続するだけであり、シンプルで小型の回路構成が実現できる。

今回製作したプロトタイプ変換装置では、各モジュールに並列に500 kΩの抵抗と9,400 pFのフィルムコンデンサを接続した。動作試験では、入力直流電圧は±2.5 kVとし、2直列モジュール当たり5 kVの電圧を印加した。

3.2 ハイブリッドペア モジュールのスイッチング特性

プロトタイプ変換装置に組み込んだハイブリッドペア モジュールのスイッチング特性を評価した。直流電圧±2.5 kV、電流330 Aの動作条件で測定したハイサイドモジュール(Q₁、Q₂)のスイッチング波形を図5に示す。Si-IEGTのターンオフ後に直列モジュール間で電圧アンバランスが発生しているが、電圧値の差は約10%以内に収まっており、良好な特性であることがわかる。電圧アンバランスの原因は、Si-IEGTのターンオフ特性の差であり、特性のそろったSi-IEGTを組み合わせることで電圧アンバランスを改善できる。

Si-IEGTがターンオンするときのSiC-PiNダイオードの逆回復電流のピーク値は200 A、逆回復時間は150 nsと非常に小さいことが確認できる。逆回復電流は振動波形となっているが、これはSiC-PiNダイオード及びSi-IEGTの接合容量、並びに並列接続したフィルムコンデンサと、配線インダクタンスとの間での共振であり、振動を低減させるために配線インダクタンスを低減することが今後の課題である。



ハイブリッドペア モジュールによるスイッチング損失低減効果を図6に示す。Si-PiNダイオードをSiC-PiNダイオードへ交換することで、従来のスイッチング損失に対して22%の損失を低減できる。また、ゲート抵抗を低減させたハードドライブを適用することで、従来に比べて50%の損失低減効果が得られ、ハードドライブがスイッチング損失の低減に非常に有効であることがわかる。

3.3 4 kHz スwitching動作試験

ハイブリッドペア モジュールを適用したプロトタイプ変換装置で、スイッチング周波数4 kHzでの連続動作試験を実施した。直流電圧±2.5 kV、負荷電流ピーク値100 Aの動作条件

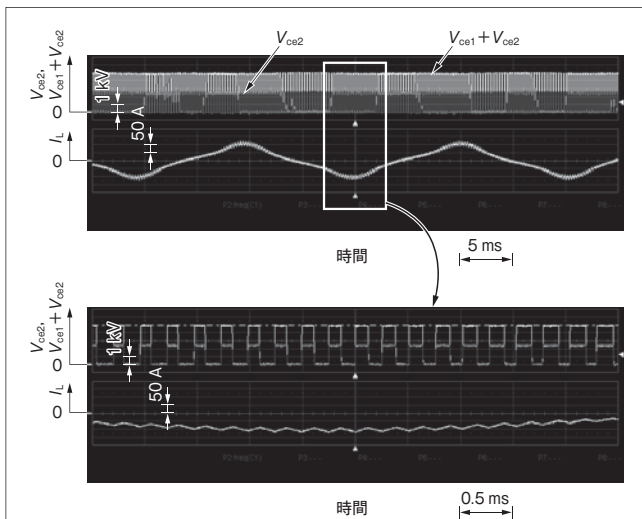


図7. プロトタイプ変換装置での4 kHzスイッチング動作の波形—4 kHzの高周波動作とした結果、負荷電流に重畳する高調波の振幅は非常に小さくなった。

Module voltage and load current waveforms of prototype power converter at switching frequency of 4 kHz

で測定したハイブリッドペア モジュールの電圧波形と負荷電流波形を図7に示す。直列モジュール間の良好な電圧分担が確認できる。また、4 kHzの高周波動作とした結果、負荷電流に重畳する高調波の振幅は非常に小さくなった。

4 あとがき

社会インフラシステム用大電力変換装置の小型・軽量化を実現できる4.5 kV-400 A級ハイブリッドペア モジュールを開発し、スイッチング損失の大幅な低減と、直列接続したモジュールの4 kHzでの高周波スイッチング動作を実証した。

今後は、SiC-PiNダイオードのいっそうの特性改善とともに、モジュールの大電流化、高速スイッチング動作に適した低インダクタンス化に向けた開発を進め、SiC-PiNダイオードを適用した大電力ハイブリッドペア モジュールの実用化を目指す。

謝辞

この研究は、独立行政法人 産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門及び先進パワーエレクトロニクス研究センター、公立大学法人 首都大学東京、並びに独立行政法人 国立高等専門学校機構 茨城工業高等専門学校との共同研究の成果である。この研究を進めるにあたり、ご協力いただいた関係者各位に感謝の意を表します。

文献

- (1) 松本寿彰 他. 大電力パワーデバイスを適用した電力変換技術. 東芝レビュー. 63. 11. 2008, p.2-8.
- (2) Tanaka, Y. et al. "Development of 6 kV-class SiC-PiN diodes for high-voltage power inverter". Proc. of International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's. Hiroshima, 2010-06, IEEE. p.213-216. (CD-ROM).
- (3) 西谷和展 他. 高耐圧大電流 IEGT. 東芝レビュー. 63. 11. 2008, p.9-14.
- (4) Takao, K. et al. "High-Frequency Switching High-Power Converter with SiC-PiN Diodes and Si-IEGTs". Proc. of IEEE Energy Conversion Congress & Expo. Atlanta, GA USA, 2010-09, IEEE. p.4558-4563. (CD-ROM).
- (5) Omura, I. et al. "IEGT design concept against operation instability and its impact to application". Proc. of International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's. Toulouse, France, 2000-05, IEEE. p.25-28. (CD-ROM).



高尾 和人 TAKAO Kazuto, D.Eng.

研究開発センター 電子デバイスラボラトリー研究主務, 工博。SiCパワー半導体素子応用技術の研究・開発に従事。電気学会会員。

Electron Devices Lab.



四戸 孝 SHINOHE Takashi

研究開発センター 電子デバイスラボラトリー研究主幹。Si縦型パワー半導体素子及びSiCパワー半導体素子の研究・開発に従事。電気学会, 応用物理学会会員。

Electron Devices Lab.



金井 文雄 KANAI Takeo

東芝三菱電機産業システム(株) パワーエレクトロニクスシステム事業部 パワーエレクトロニクス部技術主幹。大容量パワーエレクトロニクス装置の開発・設計に従事。電気学会会員。Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Systems Corp.