

SiC デバイス搭載のパワーエレクトロニクス機器

Power Electronic Equipment Equipped with SiC Devices

松本 康 MATSUMOTO Yasushi

近藤 靖 KONDO Yasushi

木村 浩 KIMURA Hiroshi

パワーエレクトロニクス機器の革新的な小型、軽量、低損失化を実現するためには、SiC（炭化けい素）や GaN（窒化ガリウム）などワイドバンドギャップの材料を使用したパワー半導体の適用が有効である。汎用インバータに Si-IGBT・SiC-SBD 半導体を用いたハイブリッドモジュールを搭載することで、インバータ部の損失を 25% 低減することが可能である。また、太陽光発電用パワーコンディショナに All-SiC モジュールを搭載することで、主回路部の効率を 99% に高めるとともに、装置全体の体積を従来機比で 4 分の 1 と大幅な小型化が実現できることを実証した。

To achieve innovative compactness, light weight, and low loss in power electronic equipment, it is beneficial to use power semiconductors that use wide bandgap materials such as SiC and GaN. By installing hybrid modules using Si-IGBT and SiC-SBD semiconductors into general-purpose inverters, Fuji Electric can reduce inverter loss by 25%. In addition, by installing all-SiC modules in power conditioners for solar power generation, we demonstrated that it can increase main circuit efficiency to 99% while also reducing the overall equipment volume to 1/4 of conventional models, which is a substantial size reduction.

1 まえがき

パワーエレクトロニクス（パワエレ）機器の革新的な小型化や軽量化、低損失化を実現するには、パッケージまで含めたパワー半導体の進歩が必要不可欠である。パワー半導体として現在主流となっている Si を材料としたデバイスは性能が限界に近づいてきており、高耐圧、低損失、さらには高周波、高温での動作が可能な SiC（炭化けい素）や GaN（窒化ガリウム）などのワイドバンドギャップの材料を使用したパワー半導体の製品開発が進んでいる。

本稿では、Si-IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）・SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）のハイブリッドモジュールと SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）・SiC-SBD の All-SiC モジュールの特徴を示し、ハイブリッドモジュールを搭載した汎用インバータの特徴を述べる。次に、All-SiC モジュールを搭載した太陽光発電用パワーコンディショナの試作装置の特徴について紹介する。

2 SiC パワー半導体モジュールの特徴

2.1 Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュール

図 1 に Si-IGBT と SiC-SBD とをハイブリッド化した PIM（Power Integrated Module）の外観と内部回路を示す。

SiC-SBD は、図 2 に示す独立行政法人産業技術総合研究所と共同開発したチップを使用し、FWD（Free Wheel Diode）に適用した。また、IGBT には第 6 世代「V シリーズ」チップを使用した。ハイブリッドモジュールは、600 V 系列が 50 A、75 A、100 A の 3 種類、1,200 V 系列が 25 A、35 A、50 A の 3 種類で合計 6 種類である。以

降のハイブリッドモジュール製品の性能と特徴の紹介は、1,200 V/50 A 品を代表例として行う。

図 3 に SiC-SBD と V シリーズ PN 接合ダイオード（V シリーズ PND）の順方向特性を示す。実使用の電流範囲では、ほぼ同じ特性となっている。また、SiC-SBD は温度上昇でオン電圧が上昇する強い正の温度特性を持っており、多並列での使用の際でも電流のバランスを取りやすい。

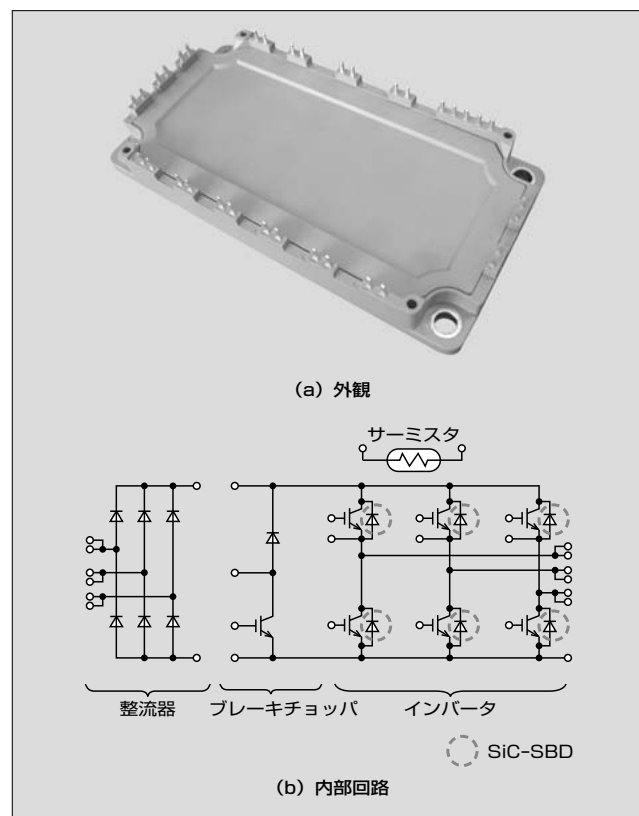


図 1 Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッド PIM

図 4 に、ハイブリッドモジュールと FWD に V シリーズ PND を使用した V シリーズモジュールの逆回復時の波形を、図 5 に IGBT のターンオン時の波形を示す。SiC-SBD はユニポーラデバイスで少数キャリアの注入が起き

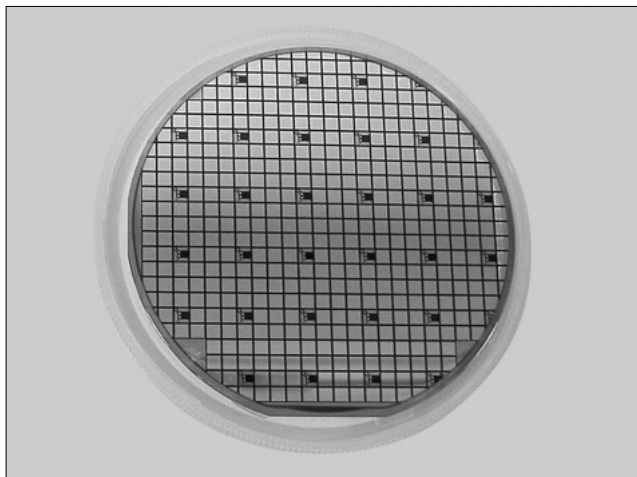


図 2 SiC-SBD チップ

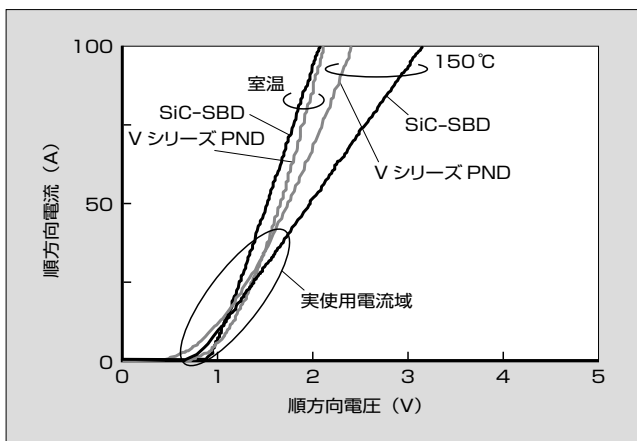


図 3 順方向特性の比較

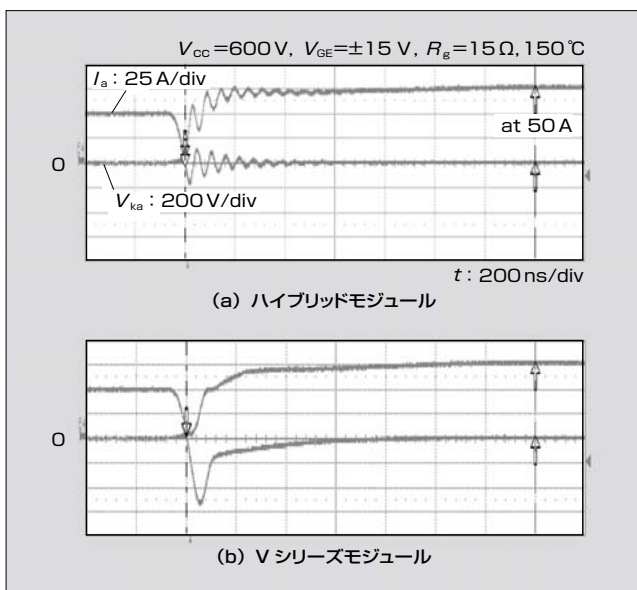


図 4 FWD 逆回復波形の比較

ないため、FWD の逆回復時におけるピーク電流の発生を抑えることができています。また、FWD の逆回復時のピーク電流を抑えることで、ターンオンする IGBT のピーク電流も抑えることができる。このことにより、V シリーズ PND に対して、定格電流 50 A 時の逆回復損失は 30% に、ターンオン損失は 46% に、それぞれ大幅に低減することができる。

図 6 に IGBT のターンオフ時の波形を示す。定格電流 50 A でのターンオフ時の跳ね上がり電圧が、V シリーズ PND に対して 47 V 低く抑えられ、ターンオフ損失も低減できる。

2.2 All-SiC モジュール

SiC-MOSFET は、図 7 に示す独立行政法人産業技術

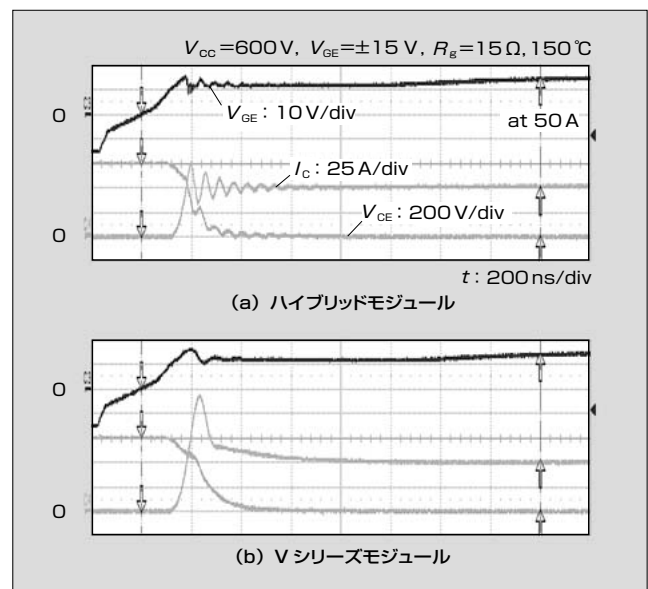


図 5 IGBT ターンオン波形の比較

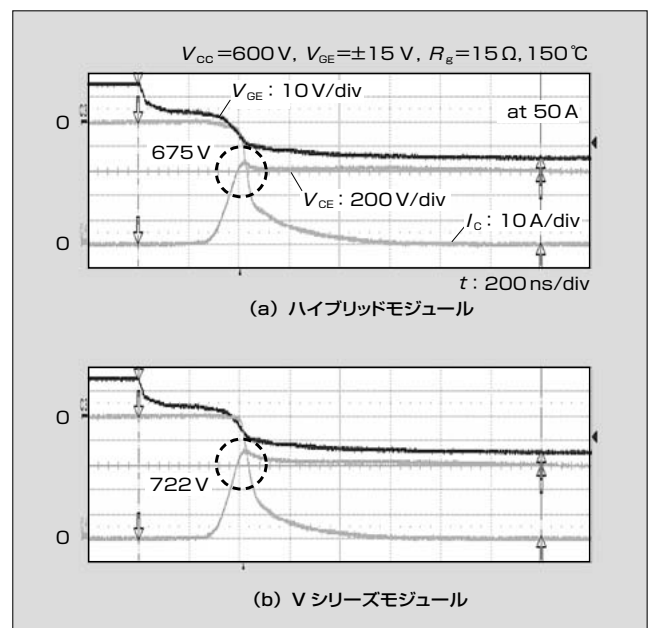


図 6 IGBT ターンオフ波形の比較

総合研究所と共同で開発した IEMOS (Implantation and Epitaxial Metal Oxide Semiconductor) チップ⁽³⁾を使用した。

チップの順方向特性を図 8 に、オン抵抗 $R_{on} \cdot A$ とゲートしきい値電圧 V_{th} の温度特性を図 9 に示す。SiC-MOSFET も SiC-SBD と同様に正の温度特性を持っており、多並列での使用の際でも電流のバランスを取りやすく

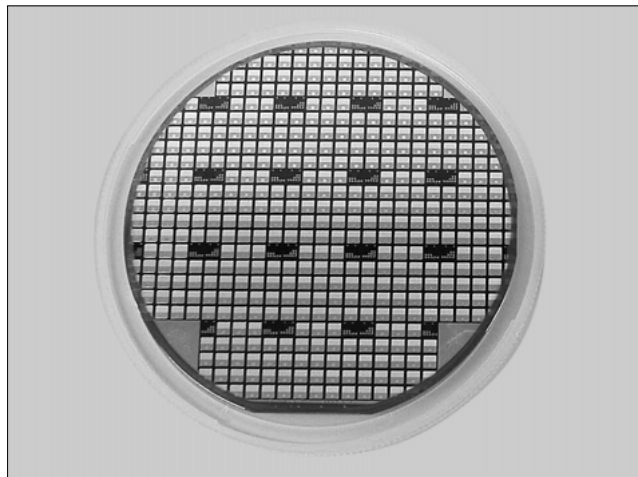


図 7 SiC-MOSFET チップ

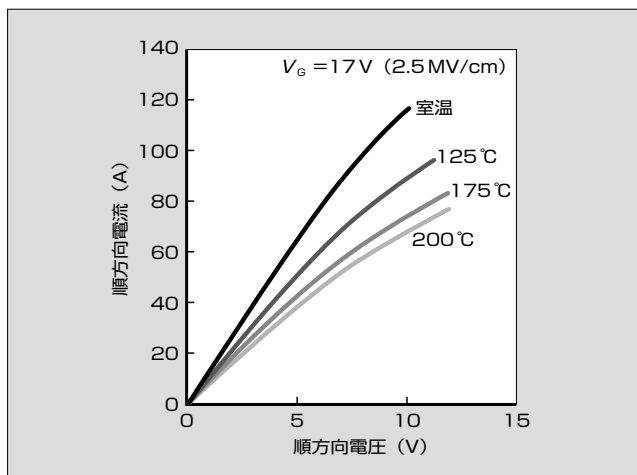


図 8 順方向特性の比較

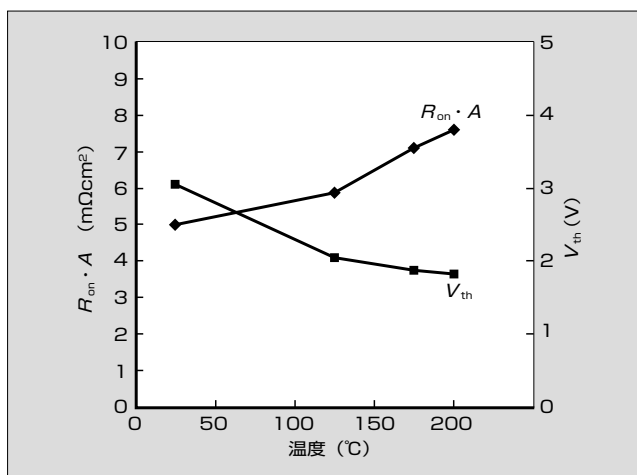


図 9 オン抵抗とゲートしきい値電圧の温度特性

なっている。また、ノーマリーオフでの低オン抵抗を実現できており、200℃の高温状態でもノーマリーオフ特性を確保できている。

図 10 に、200℃での SiC-MOSFET ターンオフ時・ターンオン時の波形を示す。ターンオフ、ターンオンともにスイッチングに要する時間が 100 ns 程度であり、Si-IGBT の 250 ns 程度に比べて大幅に短くなっている。また、温

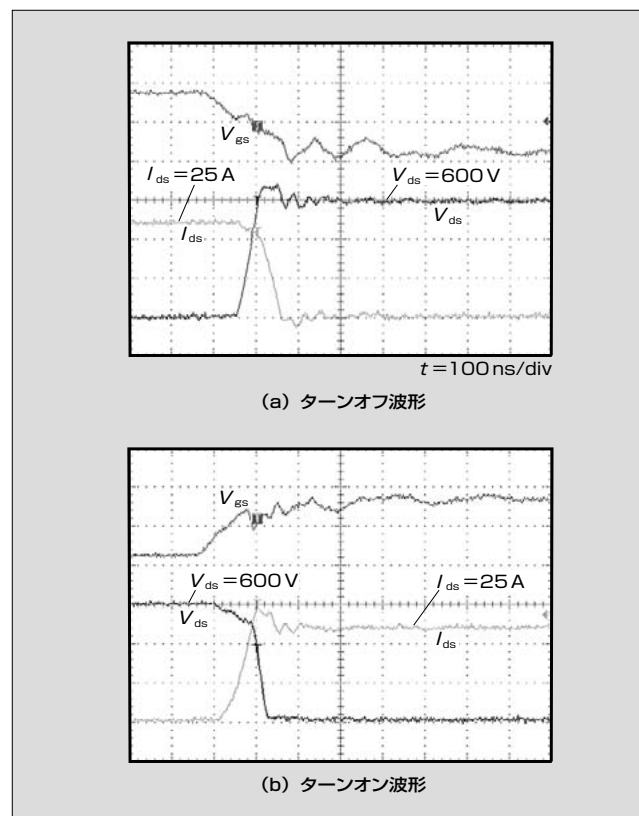


図 10 SiC-MOSFET ターンオフ時・ターンオン時の波形

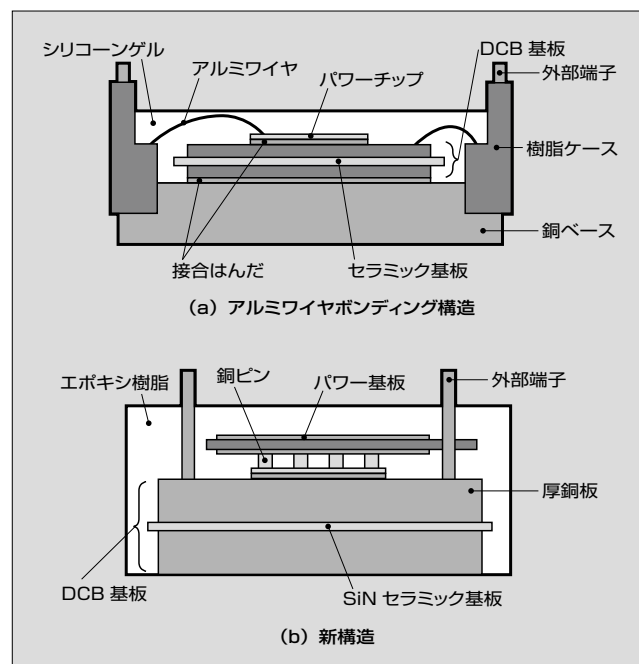


図 11 モジュール構造の比較

度によるスイッチング特性の変化は少なく、ターンオフ損失、ターンオン損失は温度にほとんど依存しない。150℃におけるターンオフ損失、ターンオン損失は、それぞれ Si-IGBT の 40% と 31% である。

図 11 に、SiC-MOSFET・SiC-SBD の All-SiC 用に開発したモジュールの構造を示す。開発したパッケージは、従来のアルミワイヤボンディング構造に替わり、富士電機独自の銅ピン接続構造を用いることで小型・高パワー密度を実現した。さらに、銅板と SiN セラミック基板からなる DCB (Direct Copper Bonding) 基板を採用することで熱抵抗を下げ、パワー密度上昇によるチップ温度 T_j の上昇を抑えた。また、シリコンゲルに替わる高耐熱エポキシ樹脂による封止構造にしたことで、チップ周辺の接合部に発生するひずみを緩和し高信頼性化も図っている。これにより、小型の SiC チップを複数個並列接続したモジュールの大容量化に対応でき、かつパッケージの小型化も実現した。図 12 に、1,200 V/100 A 定格の 2 in 1 タイプの All-SiC モジュールの外観およびフットプリントサイズ (床面積) の比較を示す。フットプリントサイズは、現行構造の同定格の Si モジュールと比べて半分である。

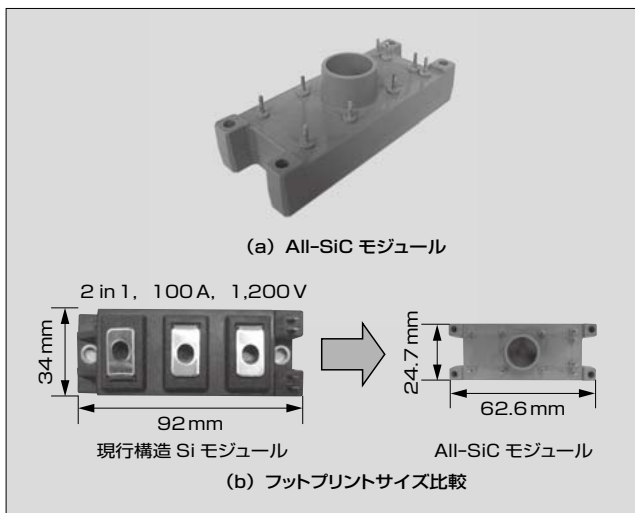


図 12 All-SiC モジュールの外観およびフットプリントサイズの比較

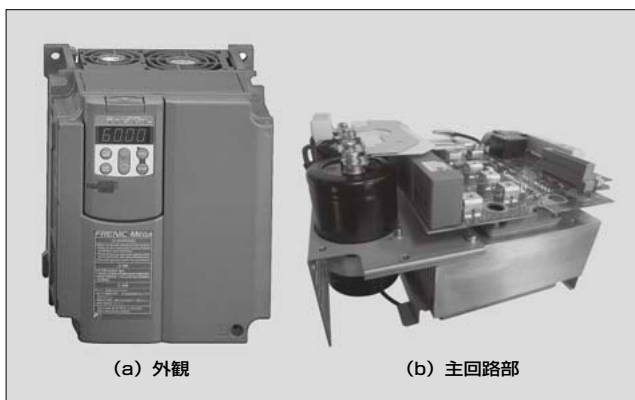


図 13 「FRENIC-MEGA GX-SiC」

③ SiC 適用パワーエレ機器

3.1 SiC-SBD 搭載汎用インバータ

工場の生産設備や空調設備で使用される電動機駆動用インバータのさらなる高効率化を図るために、Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュールを搭載した汎用インバータ「FRENIC-MEGA GX-SiC」を開発した。これは、FRENIC-MEGA における同期モータ駆動専用 GX の新シリーズであり、三相入力の 200 V 系列 5.5, 7.5, 11 kW と 400 V 系列 5.5, 7.5, 11 kW の 6 機種である。図 13 に 400 V/11 kW 機の外観と主回路部の外観を示す。ハイブリッドモジュールを搭載することで、逆回復損失、ターンオン・ターンオフ損失などのスイッチング損失が減り、汎用インバータでの発生損失を Si デバイス搭載の従来機種に比べて 25% 低減できた (図 14)。これにより、高効率 IPM モータ「GNS シリーズ」「GNP シリーズ」との組み合わせで、さらなる高効率なドライブシステムが実現できた。

3.2 All-SiC モジュール搭載パワーコンディショナ

All-SiC モジュールを適用し、小型化、高効率化を可能にする太陽光発電用パワーコンディショナを製作した。装置の回路構成は図 15 に示す A-NPC 3 レベルとし、フィ

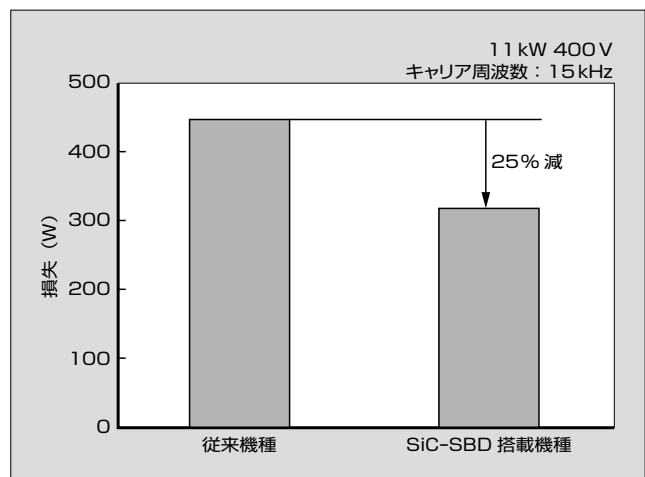


図 14 汎用インバータ発生損失の比較

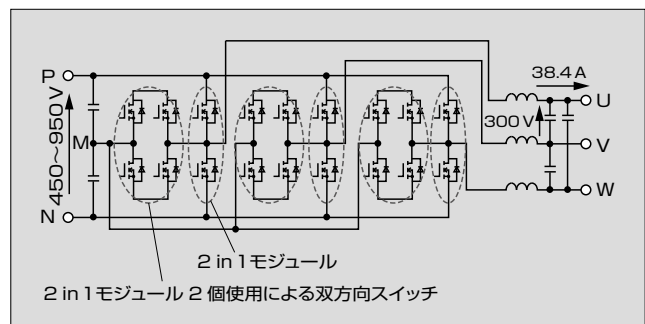


図 15 All-SiC パワーコンディショナの回路構成

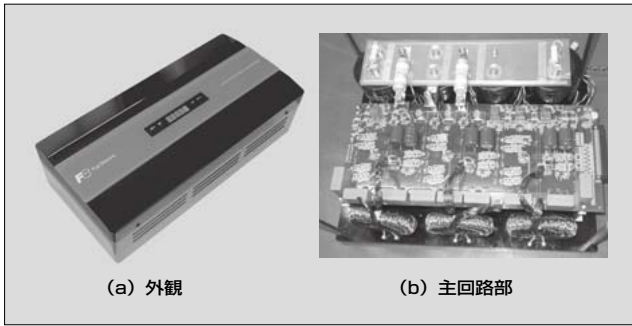


図 16 All-SiC パワーコンディショナ

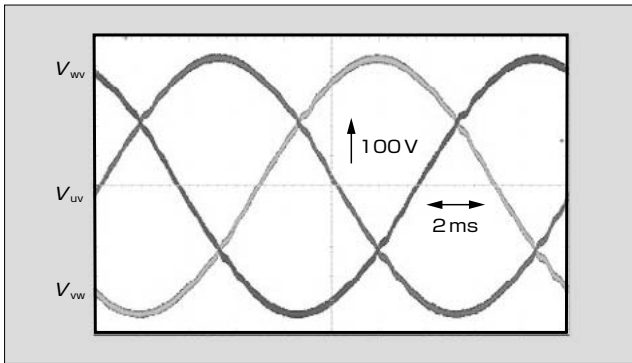


図 17 パワーコンディショナ出力波形

ルタの小型化とスイッチング損失のバランスを考慮してスイッチング周波数を 20 kHz とした。図 16 に 20 kW 装置の外観と主回路部の外観を示す。All-SiC モジュールを適用することで、フィルタと冷却フィンの小型化が図れ、パワーコンディショナ装置全体の体積を従来機比で 4 分の 1 にすることができた。図 17 は、単独で運転したときの三相出力電圧波形である。スイッチング周波数を上げてフィルタを小型化しても、ひずみ、リップルともに少ない波形となっている。また、主回路部の効率は 99% であり、大幅な効率向上も実現した。

4 あとがき

Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュールを搭載した汎用インバータ製品を開発し、All-SiC モジュールを搭載した太陽光発電用パワーコンディショナを製作した。SiC を使用したパワー半導体モジュールをパワーエレクトロニクス機器に搭載することで、装置のさらなる高効率化や小型化が可能となる。今後は、SiC の特性を最大限に発揮できるパッケージ技術や回路技術の開発を続け、パワーエレクトロニクス機器の飛躍的な進歩に貢献する所存であ

る。

SiC チップの開発にご協力いただいた独立行政法人産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センターの関係各位に謝意を表す。本開発の一部は、独立行政法人産業技術総合研究所産業変革研究イニシアティブ“SiC デバイスの量産試作による実証化検証”により行われた。

参考文献

- (1) Tsuji, T. et al. “Experimental demonstration of 1200 V SiC-SBDs with lower forward voltage drop at high temperature”. Proceedings of ICSCRM 2011, Tu-P-27, 2011, p.205-208.
- (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) Harada, S. et al. “High performance SiC-IEMOSFET/SBD module”. Proceedings of ICSCRM 2011, MO-3 A-1, 2011, p.52-57.
- (4) Horio, M. et al. “New Power Module Structure with Lower Thermal Impedance and High Reliability for SiC Devices”. Proceedings of PCIM Europe, 2011, Proceeding CD, 2011, p.229-234.
- (5) Ikeda, Y. et al. “Investigation on Wirebond-less Power Module Structure with High-Density Packaging and High reliability”. Proceedings of International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's 2011, Proceeding CD, p.272-275.



松本 康

パワーエレクトロニクス機器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター応用技術開発部長。博士（工学）。電気学会上級会員，IEEE 会員。



近藤 靖

可変速駆動装置の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター製品技術開発部主査。



木村 浩

酸化物、有機半導体薄膜デバイスの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代デバイス開発センター SiC プロジェクト部長。



*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。