

巻頭論文

パワーモジュールの最新動向と展望



ゴラブ マジュムダール*



山田順治**

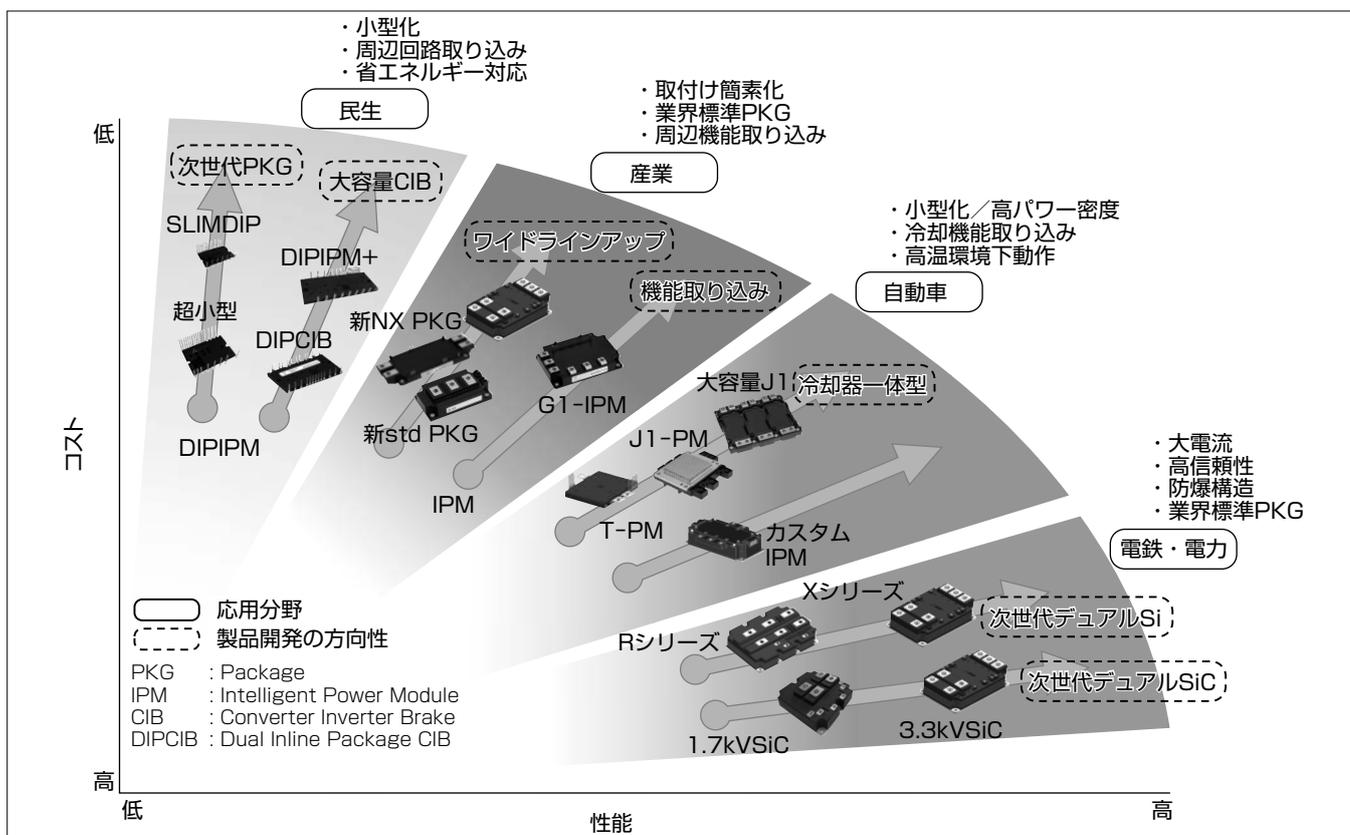
Latest Trend and Prospect of Power Module Technology

Gourab Majumdar, Junji Yamada

要旨

地球温暖化対策として二酸化炭素の総排出量が規制され、化石燃料を燃焼している内燃機関や火力発電所そのものの転換が必要となってきた。ガソリン車から電気自動車へ、火力発電から再生可能エネルギー発電へ、産業の動力源が電気によるモータ駆動に移り変わってくると、電気を創る・送る・蓄める・使うにかかわる全ての工程で使用されるパワーエレクトロニクス(パワエレ)機器で更なる変換効率の改善が必要となってくる。パワーモジュールはこの機器の性能を左右する重要なキーデバイスとしてこれまで以上に、多様化する機器の要求に応える必要がある。三菱電機はシリコン(Si)半導体に加え、次世代半導体のシリコンカーバイド(SiC)素子をラインアップすることでより高いスイッチング周波数での駆動を可能にし、更に高い耐電圧素子の

開発を進めることで市場からの電気的特性の要求に応えている。一方でパワーモジュールの耐環境性や寿命の向上には、チップを支えるパッケージ技術が重要になってくる。当社は樹脂ケースをシリコンゲル封止する従来タイプのパッケージに加え、モールドパッケージや樹脂封止パッケージを展開している。また、セラミック絶縁基板に加えて樹脂系の絶縁材の展開を図るなど、多様化する市場要求に応える要素技術を確立してきた。さらに、ユーザー要求の多様化に応える技術として、ユーザー側の設計や組立ての負荷軽減のための高機能技術やEMC(ElectroMagnetic Compatibility)の改善にも取り組んでいる。これらの要素技術を応用分野ごとに選択したバランス設計でコスト低減を図りながら、高性能、小型・軽量化を進めていく。



パワーモジュール製品の普及・拡大に向けた多様な製品群の開発トレンド

定格耐電圧が数百Vから数千V、定格電流が数Aから数千Aの大きな容量域をカバーするパワーモジュールは、民生、産業、自動車及び電鉄・電力などの応用機器に使用されている。応用分野の拡大に伴って、パワーモジュールへの要求が多様化しているが、高性能化技術と低コスト化技術を基盤技術として継続的に改良するとともに、用途に応じた技術の取捨選択を行って製品化を進めていく。

1. ま え が き

現在のパワーモジュールの主流はSi素材のIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)で、絶え間ない性能向上によって、数Aから数千Aまでの電流量と、数百Vから数千Vまでの定格電圧を実現するに至っている。しかしながら、パワエレ機器の用途拡大と効率改善の必要性から、パワーモジュールに要求されるスペックも、低損失化、小型・軽量化、高密度化、長寿命化など多様化してきた。当社ではこれらの要求に応えるため、シリコン素材の第7世代チップ、SiCチップを中心とした最新チップ技術とモールドパッケージなどの最新パッケージ技術をバランス良く採用することで、用途に最適化したパワーモジュールを市場に提供している。

本稿では、バランス設計を推進している当社パワーモジュールの最新動向と展望について述べる。

2. パワーモジュール技術の最新動向

2.1 パワーチップ技術

現在、パワーモジュールに搭載される半導体チップの主流はSiベースのIGBTとダイオードである。当社は、2002年頃に電荷蓄積形トレンチゲートバイポーラトランジスタ“CSTBT”を第5世代IGBTとして市場に提供開始した。その後チップ表面加工の微細化技術によるゲート構造の最適化や、極薄ウェーハ技術による n^- 層厚さの最適化、さらにはチップ裏面のパターニング技術などを採用し、性能向上を行いながら常に最適な特性のチップを市場に提供してきた。最新の第7世代チップは一代前前の第6世代チップに対して約10%の特性改善を図りながら、ゲート抵抗による dv/dt 制御性を改善し、EMI(Electro Magnetic Interference)ノイズの低減やサージ電圧制御といった、ユーザーが使いやすい特性を目指してきた。

一方で、IGBTと逆並列に使用される還流ダイオード(Free Wheeling Diode : FWD)の順方向電圧(V_F)と逆回復損失(E_{rr})のトレードオフ改善も図っている。図1に従来品と最新の第7世代ダイオードの断面構造比較を示す。

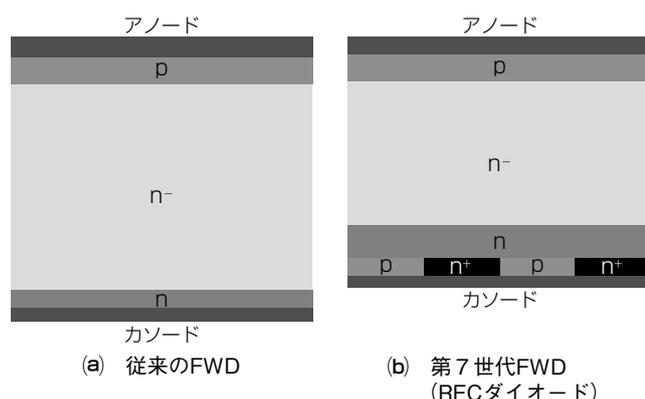


図1. 従来品とRFCダイオードの断面構造

第7世代ダイオードはRFC(Relaxed Field of Cathode)と呼ばれる特殊な裏面構造を持つ。一般的にダイオードチップの特性改善を目的に n^- 層厚を薄くする手法が用いられるが、 n^- 層を薄くすると逆回復時にリングングが発生しやすくなって薄厚化に限界があった。RFCダイオードは、部分的に設けたp層が逆回復時に適切な量のホールを n^- 層に注入することで、裏面近傍でのキャリアの急しゅんな消滅を抑制し、特に低電流時に発生しやすい逆回復時の電圧波形のリングングを抑制する。これによって第7世代ダイオードはリングングを抑制しながら特性改善を図っている。

更なる特性改善を求めて、WBG(Wide Band Gap)半導体のSiCを材料としたパワー半導体チップの開発を進めている。SiCはSiと比較して絶縁破壊電界が約10倍の大きな値を持つことが、パワーデバイスに用いた場合に本質的に有利に働く。これによってSiCを用いることで、Siでは実現困難な高耐圧領域まで、損失の低いユニポーラ形のトランジスタとダイオードを実現できる。SiCでは特にスイッチング動作時の損失の低減が顕著であり、Siを用いたバイポーラ形と比較し、1/10程度までスイッチング損失の低減が可能である。SiCによって高速動作、高周波動作を可能にするパワーチップを実現でき、様々なパワエレ機器の小型化・高性能化などに寄与する。

SiCを用いたトランジスタとして、耐圧600Vから3.3kVのMOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)の開発に取り組んでおり、順次、製品への適用を進めている。現在、第2世代品として、MOSチャンネル部の注入、JFET(Junction Field Effect Transistor)部の構造の改良を行ったMOSFETを開発中であり、更なる低損失化を進めている。

将来技術として、還流ダイオードに用いるSBD(Schottky Barrier Diode)をMOSFETに内蔵したSBD内蔵MOSFETの開発を進めている。図2にSBD内蔵MOSFETのMOSセル部の断面構造図を示す。MOSセルの内部にショット

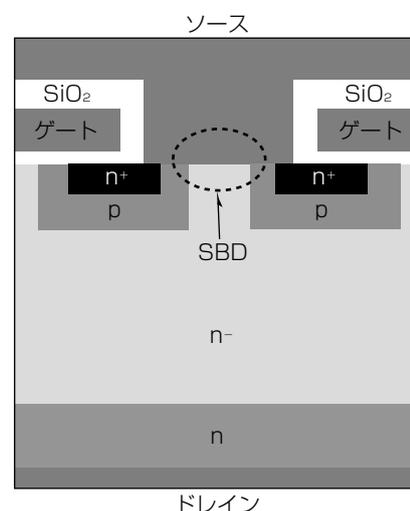


図2. SBD内蔵MOSFETの断面構造

キー電極を形成し、ソースからドレインへの逆方向の電流を、内蔵したSBDに通電できる構造を作り込んでいる。

SBDを内蔵することのメリットは、通常MOSFETに逆並列に接続される還流ダイオードを省略できることに加え、MOSFETのボディダイオードへの通電を抑制できることにもある。MOSFETのボディダイオードに通電した場合、バイポーラ動作によって生成したホール、電子が再結合することで結晶欠陥が拡張し、オン抵抗が増加するものが存在する。SBD内蔵MOSFETでは、ホールが注入されないため、結晶欠陥は拡張しないので劣化は生じない。実使用時の通電条件に応じて内蔵SBDの構造を適切に設計することによって、ボディダイオードの通電劣化を気にせず、安心して使えるMOSFETを実現できる。

2.2 パッケージ技術

SiベースのIGBTモジュールの $T_j(\max)=175^\circ\text{C}$ が一般的になり、さらにSiCチップによる高 T_j 化を見据えて、 $T_j>200^\circ\text{C}$ 達成のためのパッケージの各要素技術を述べる。

2.2.1 チップ接合技術

環境規制で鉛(Pb)の使用が規制されたことで、現在はスズ(Sn)合金材料のはんだが主に使用されている。 $T_j>200^\circ\text{C}$ 達成のための次世代チップ接合としてナノ銀パウダーに代表される微細金属パウダーによる金属焼結結合の採用が開始されている。一般的に金属焼結結合にはチップと絶縁基板とに挟まれた金属粉を高温・高圧にすることで結合させるためチップへのストレスが問題となる。当社ではチップへのストレス緩和策を講じるとともに、低圧力でも結合可能な金属焼結結合の開発を進めている。

2.2.2 ワイヤ配線技術

現在、パワーモジュールのワイヤ配線にはアルミニウム(Al)又はその合金ワイヤが使用されている。モジュールの小型化や $T_j>200^\circ\text{C}$ 達成のための次世代ワイヤ配線技術として一般的には銅(Cu)ワイヤの使用が提案されている。しかし、銅ワイヤをチップに接合させるにはチップ表面に銅やニッケル(Ni)など堅い金属を使用する必要がある。当社では、銅ワイヤをしのぐ通電能力と、寿命向上などを目的に銅リードを使用したDLB(Direct Lead Bonding)構造を一部のパワーモジュールに採用している。

2.2.3 放熱技術

パワーモジュールは一般的に放熱グリースなどを塗布してヒートシンクに搭載されるが、更なる冷却効率改善とパワーモジュールの長寿命化要求に応えるためパワーモジュールと放熱フィンを一体化した製品を量産化している。この構造では、絶縁基板下のはんだ層と放熱グリースの層を削減でき、放熱効果を向上させて高電力密度実装を実現している。

2.2.4 封止材料

一般的なパワーモジュールに封止材として使用される

シリコンゲルは高温環境では不安定になることがある。 $T_j>200^\circ\text{C}$ 達成のために、当社ではシリコンゲル封止に代わる、ダイレクトポッティング(DP)樹脂封止技術を確立した。DP樹脂は高温環境だけでなく、シリコンゲルが凝固する -50°C 以下の環境にも耐えることができる。さらに低気圧環境や腐食性ガスの浸入耐量など高い耐環境性も持ち合わせている。最新の自動車応用や産業応用のパワーモジュールには樹脂封止パッケージを主に採用しており、今後は更に大型の電鉄・電力応用のパワーモジュールへも展開していく。

3. 市場別の製品技術と展望

3.1 民生応用製品

民生用パワーモジュールの最大市場であるエアコン市場からは、国内の省エネルギー性能競争を目的とした高級エアコン用途とアジア市場を中心としたコスト優先の普及エアコン用途の両面の要求がある。当社は、高い変換効率を要求される高級エアコン用に、IGBTに比べて低電流動作時の損失を低減できるSJ(Super Junction)-MOSFETと低温暖房時など定格動作にも対応できるようにIGBTを並列接続したSJ-MOSFET内蔵DIPIPMを量産化してきた。さらに、エアコンの省エネルギー指標であるAPF(年間エネルギー消費効率)で国内最高レベルの性能をもたらす技術として、SiC-MOSFETを内蔵したフルSiC DIPIPMを製品化している。定格電圧600V、電流容量15Aの従来のSi IGBT搭載DIPIPMとSiC MOSFET搭載DIPIPMの損失比較を図3に示す。

一方、システムコスト低減が必要な普及エアコン用には、“SLIMDIPシリーズ”を量産化済みである。第7世代IGBT技術を活用したRC-IGBT(Reverse-Conducting IGBT: IGBTとFWDを同一チップ上に構成)を採用することで、従来の性能・機能を損なうことなく当社超小型DIPIPMに対してパッケージ体積を30%小型化した(図4)⁽⁵⁾。

3.2 産業応用製品

産業用モジュールは、従来のケースタイプのモジュール

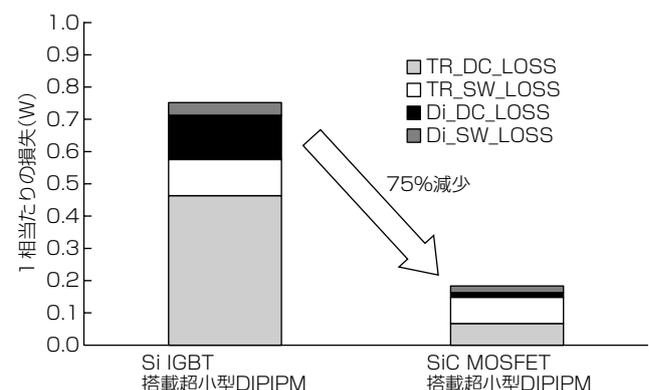


図3. DIPIPMの損失比較

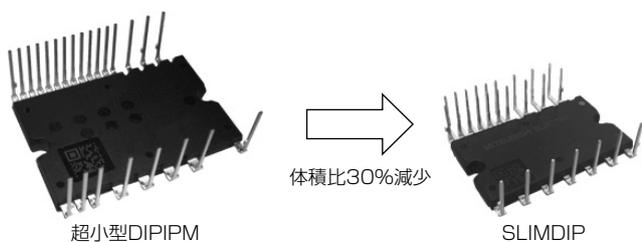


図4. 超小型DIPIPMとSLIMDIP

を中心に製品展開を行っているが、近年、応用分野の広がりや分野別のモジュールへの要求が多様化し始めている。そこで当社では小容量帯産業機器向けに民生応用向けのDIPIPMで培った技術を利用したトランスファーモールド外形の“DIPIPM+シリーズ”を製品化した⁽⁶⁾。この製品はインバータシステムに必要となる三相コンバータ、インバータ、ブレーキ回路及びゲート駆動IC、各種保護回路を内蔵したオールインワンタイプのDIPIPMである。各種機能を内蔵することによる小型化だけでなく、最適な端子配置によってパターン設計がしやすく基板サイズの削減も行うことでインバータシステムをコンパクトに構成でき、システムコスト低減が可能となる。図5にDIPIPM+の代表的な配線接続例を示す。

中・大容量領域では、リーマンショック以降、BCP (Business Continuity Plan)対策として複数社購買が可能なパッケージ互換性が重要視されている。この市場要求に応えながら“使いやすさ”をキーワードに封止構造、絶縁構造を刷新し、SLC(SoLid Cover)技術を採用した第7世代IGBT モジュール“NXシリーズ”を開発した。SLC技術とは封止材として従来使用していたシリコンゲルをエポキシ系樹脂に変更し、構成部材の熱膨張率を均一化することで、温度変化に伴うパワーモジュールの反(そ)り量を抑制する技術である。このSLC技術と樹脂絶縁銅ベース板を組み合わせることで大幅な温度サイクルの長寿命化を実現した。図6に従来構造とSLC構造の比較を示す。また、図7に従来構造とSLC構造との温度サイクル(条件：-40~125℃：各1時間保持)耐量比較を示す。

さらに、温度変化に伴うパワーモジュールの反り量の変化が小さいため、ポンピングアウト現象(ヒートシンクに塗布された放熱グリースが外部に押し出される現象)の軽減にも効果がある。図8に温度変化でのベース板の形状変化比較を示す。

IPM(Intelligent Power Module)でも同様にSLC技術を採用した“G1シリーズ”を開発した。新たに駆動速度切替え機能を搭載し、ノイズ源となり得る低電流領域では駆動速度を抑え、効率(=発生損失)に影響する中・大電流領域では高速駆動させることで、今まで背反事項であったノイズ低減と損失低減の両立でユーザーの使いやすさを追求した。

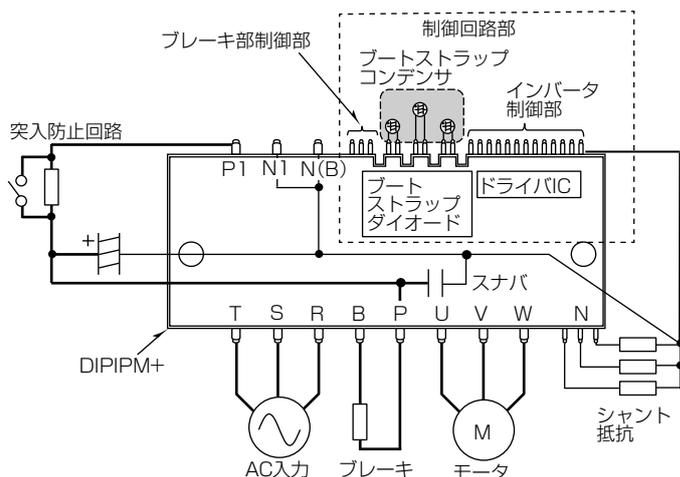


図5. DIPIPM+使用時の配線接続例

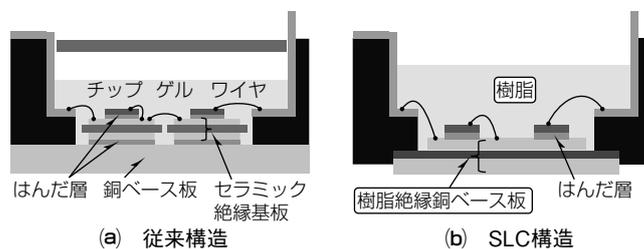


図6. 内部構造の比較



図7. 温度サイクル耐量比較

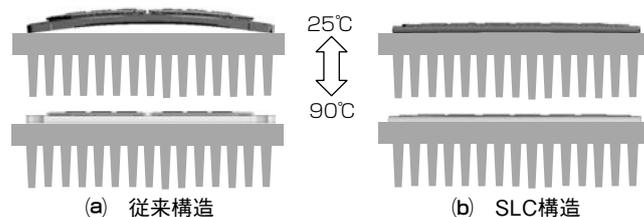


図8. ベース板の形状変化比較

3.3 自動車応用製品

自動車市場へは当初はケースタイプと呼ばれるパッケージ形状のIPMが主流であったが、移動体の宿命でもある小さく・軽く・力強くとの市場要求からパワーモジュールの小型化・高パワー密度化を進めてきた。小型化要求に対してトランスファーモールド技術を採用した長寿命のパワーモジュール“T-PMシリーズ”を市場に提案した。さらに小型化に加えて高パワー密度化に応えるため、アルミニウム放熱フィンをパワーモジュールのベース板と一体化

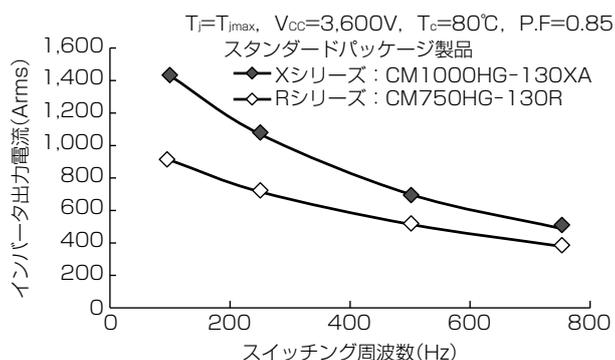


図9. インバータ出力電流比較



図10. 3.3kV LV100タイプ

した“J1シリーズ”を製品化した。J1シリーズには専用の水冷ジャケットやコントロール基板、スナバコンデンサなどを準備し、ユーザーの設計サポートも充実させている。市場からの更なる出力向上要求に応えるため、出力電流を拡大させた“大容量J1シリーズ”も追加してラインアップし、さらにSiCチップ化も含めてパワーモジュールの小型化・高パワー密度化を進めていく。

3.4 電鉄・電力応用製品

高耐電圧製品として、これまで3.3kV/1,500Aや6.5kV/750Aの“Rシリーズ”をラインアップして大容量システムに展開してきた。電鉄市場及び洋上風力発電や国際連携直流送電市場からの要求である、更なる大容量化、パッケージの互換性、並列使用の容易性に応えるため、当社では、従来パッケージと互換性を持った“Xシリーズ・スタンダードタイプ”と並列接続が容易となる“Xシリーズ・LV100タイプ”を開発した。第7世代IGBTチップ技術とRFCダイオードを採用し、定格電流を従来比で20~30%増加させた。また、LNFLR(Linearly-Narrowed Field Limiting Ring)技術によってチップの導通領域を拡大させて熱抵抗の大幅低減も実現した。さらに、動作温度Tjopを125℃から150℃に拡大したことでインバータ出力電流

をRシリーズに比べて50%増加(@200Hz動作時)させることができた。図9に同じパッケージサイズの6.5kV XシリーズとRシリーズのインバータ出力電流比較を示す。

一方、LV100タイプはスタンダードタイプと同じ第7世代チップを採用することで損失低減を図り、2 in 1のハーフブリッジ構造とすることでパッケージ内部インダクタンスを低減した。また、主端子及び補助端子配置を最適化することによって並列接続を容易にした。図10に3.3kV LV100タイプの製品を示す。今回開発した3.3kV/600A製品は、業界最大^(注1)のパワー密度によってインバータの高出力・小型化を実現した。並列接続することで多様な容量のインバータ構成が可能になる。

(注1) 2017年12月1日現在、当社調べ

4. むすび

当社はSi素材の第7世代チップ、SiCチップを中心とした最新チップ技術とモールドや樹脂封止などの最新パッケージ技術を組み合わせることで、パワエレ市場のどのような要求にも対応できるバランス設計を進めている。タイムリーに製品を市場に展開することで、低炭素社会の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) パワーデバイス, 三菱電機技報, 90, No.5 (2016)
- (2) 人と社会を支えるパワーエレクトロニクス, 三菱電機技報, 91, No.7 (2017)
- (3) Hino, S., et al.: Demonstration of SiC-MOSFET Embedding Schottky Barrier Diode for Inactivation of Parasitic Body Diode, Materials Science Forum, 897, 477~482 (2017)
- (4) Ohara, K., et al.: A New IGBT Module with insulated Metal Baseplate(IMB) and 7th Generation Chips, PCIM Europe 2015, 1145~1148 (2015)
- (5) Shibata, S., et al.: New Transfer-Molded SLIMDIP for white goods using thin RC-IGBT with a CSTBTM structure, PCIM Europe 2015, 1149~1154 (2015)
- (6) Yamaguchi, K., et al.: A New Version Transfer Mold-Type DIPIPTMs with built-in Converter and Brake function, PCIM Asia 2015, 272~276 (2015)