

パワーモジュールの最新動向と展望

Latest Trend and Prospect of Power Module Technology



西原秀典*
Hidenori Nishihara



松岡 徹†
Toru Matsuoka

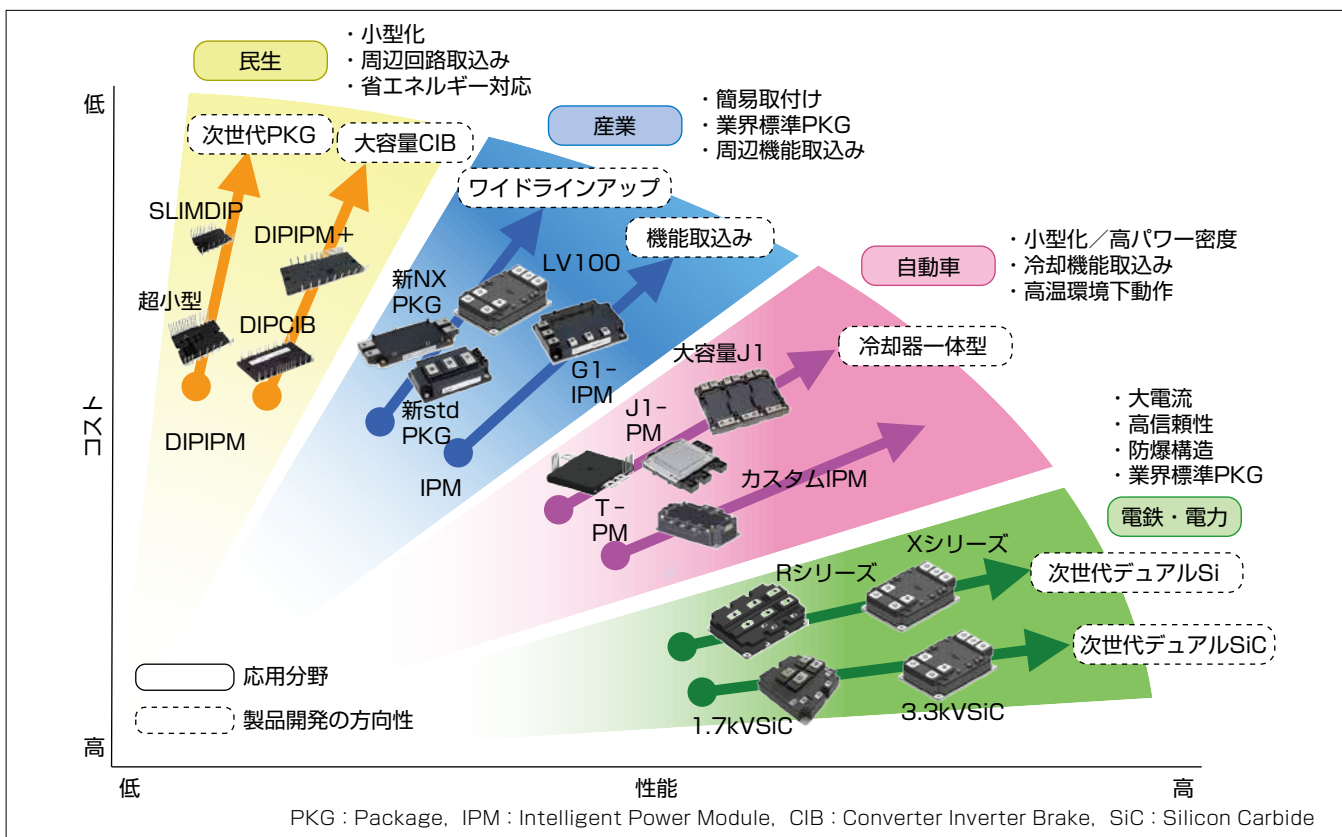
要旨

世界的な人口増加や新興国の経済発展などに伴い、エネルギー需要は急拡大を続けており、日本でも二度の石油危機後や近年の不況時を除いて消費量は一貫して増加している。石油危機以降の部門別エネルギー消費量は産業部門が約0.9倍、運輸部門が約1.9倍、住宅・建築物などの民生部門が約2.5倍となっており、従来十分な努力によって省エネルギーを進めてきた産業部門での省エネルギー対策に加え、電鉄や自動車の燃費向上、エアコンや冷蔵庫の消費電力低減など様々な分野で一層の省エネルギーを進める必要がある。

これらを実現するにはパワーエレクトロニクスの更なる発展は必要不可欠であり、新しい変換方式や新たな回路構

成の提案がなされる中、機器性能を大きく左右するキーパーツであるパワーモジュールも、これまで以上に多様化する市場ニーズに応える必要がある。

三菱電機ではシリコン(Si)素材に加え、次世代半導体のシリコンカーバイド(SiC)素材のチップを搭載したパワーモジュール製品のラインアップを拡大してきた。劇的な損失改善を図る一方で更に高い耐電圧素子の開発も進め、市場からの電気的特性の要求に対応している。また、チップ性能を最大限に引き出すパッケージ技術では、耐環境性や寿命向上、ユーザー側での設計・組立ての負荷軽減などにも取り組んでいる。



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

電気エネルギーを効率的に利用し、創エネルギー・省エネルギーに貢献できるパワーエレクトロニクス技術の応用範囲は、産業・民生・自動車・太陽光発電・風力発電など多岐にわたる。このキーパーツとして拡大を続けるパワーデバイスの代表素子であるIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)は現在第7世代まで進化が進んでおり、更なる高効率化、小型・軽量化、長寿命化など、様々な市場ニーズに対応している。さらに、SiCチップや耐環境性能を向上させたパッケージ、トランスファーモールドパッケージなどと組み合わせ、最適化されたパワーモジュールを市場に展開している。

本稿では、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、高性能化、小型・軽量化を進めていく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

パワーモジュールに搭載されるIGBTは2002年頃、第5世代製品として市場投入された電荷蓄積形トレンチゲートバイポーラトランジスタ“CSTBT”以降、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、極薄ウェーハ技術によるn⁻層厚さの最適化などの最新技術を取り込むことによって性能向上を繰り返しながら市場にマッチした最適特性のチップを提供してきた。

最新の第7世代チップは一世代前の第6世代チップに対して約10%の発生損失の低減を図りながら、ゲート抵抗によるdv/dt制御性を改善した。IGBTと逆並列で接続される還流ダイオード(Free Wheeling Diode : FWD)もRFC(Relaxed Field of Cathode)ダイオードを搭載することで順方向電圧V_Fと逆回復損失Errのトレードオフ改善を図りながら、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た。

図1に従来構造のFWDと最新のRFCダイオードの断面構造比較を示す。一般的にFWDの特性改善にはn⁻層厚を薄くする手法が用いられていたが、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る背反事項があり、薄厚化には限界があった。

そこで、新たに開発されたRFCダイオードは、カソード部に部分的に設けられた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

急峻(きゅうしゅん)な消滅を抑制する。特に低電流の逆回復時に発生しやすいとされる電圧波形のリングング抑制に効果を発揮する。

また、小型・高パワー密度、高効率、高周波駆動、高温動作など、様々な可能性を秘めた次世代半導体素子として注目されているSiCの基本特性を表1に示す。

特にSiCは絶縁破壊電界強度がおおよそ10倍あることから、パワーデバイスとして様々な恩恵を得ることが出来る。例えば高耐電圧製品では耐電圧保持のためにチップ周辺に構成されるガードリング領域が狭められ、より大容量チップを搭載可能になる。また、ユニポーラ形デバイスのMOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)やSBD(Schottky Barrier Diode)は高耐電圧化を図ろうとするとn⁻層を厚くしなければならないのでSiではオン抵抗が急増してしまうが、SiCでは理論的にはn⁻層を1/10程度まで薄くでき、高耐電圧領域でも低いオン電圧が実現可能になる。ユニポーラ形デバイスのようにテール電流がなく、高周波動作時でも発生損失が低減できるため、様々なパワーエレクトロニクス機器の小型化・高性能化などに寄与できる。

MOSFETの性能向上にはセルの微細化が効果的であるが、図2に示すようにJFET(Junction Field Effect Transistor)長が一定以下になると急激にオン抵抗が上昇する。当社の第2世代SiC MOSFETではこの問題を解決するためにJFET部の濃度プロファイルを最適化させて高性能化を実現している。

SiC MOSFETではボディダイオードへのバイポーラ電流による基底面転位(Basal Plane Dislocation : BPD)を基準にした積層欠陥の拡張が一般的に知られており、使用

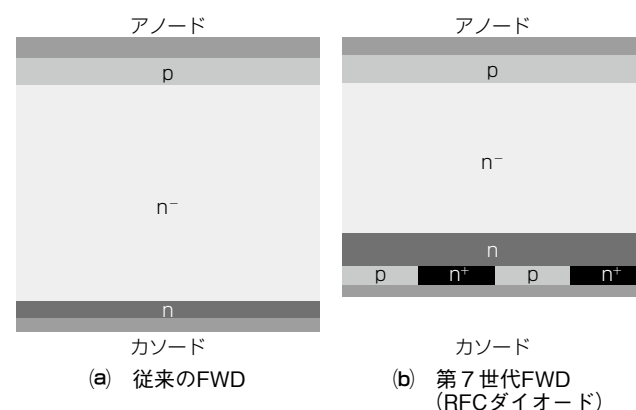


図1. 従来品とRFCダイオードの断面構造

表1. SiとSiCの物性値比較

	対Si比	効果
バンドギャップ	3倍	高温動作
絶縁破壊電界強度	10倍	低オン抵抗・高耐電圧
電子飽和速度	2倍	高速動作
熱伝導率	3倍	高放熱性

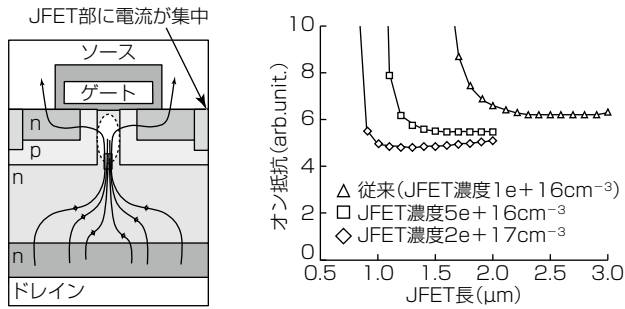


図2. JFET長・オン抵抗・JFET濃度の関係

中にオン抵抗が増加するものがある(図3)。

SBDをFWDとして逆接続することで、これを回避しているが、次世代技術としてSBDを内蔵したMOSFETの開発を進めている。この技術はボディダイオードの通電劣化を気にせずに安心して使用できるMOSFETパワーモジュールを提供できるだけでなく、FWDの搭載が不要となるため、パワーモジュールの更なる高電力密度化実現の可能性を大いに秘めている(図4)。

また、トレンチゲート化による特性改善も着々と進んでおり、今後600~1,200V耐電圧製品を中心に展開予定である。

2.2 パッケージ技術

SiベースのIGBTモジュールのTj(max) = 175°Cが一般的になり、さらにSiCチップによる高Tj化を見据えて、Tj > 200°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。Tj > 200°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になるが、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

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が、モジュールの小型化やTj > 200°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)など硬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。

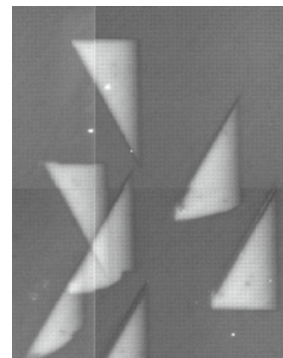


図3. BPDから拡張した積層欠陥

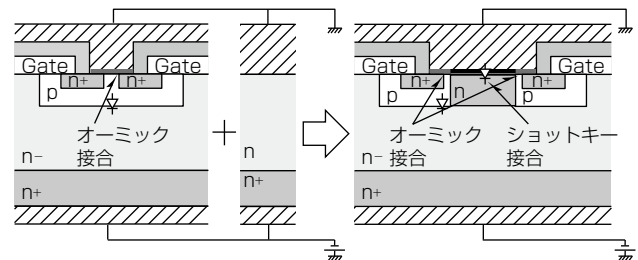


図4. SBD内蔵型MOSFET
(a) 従来型MOSFET(SBD搭載必要) (b) SBD内蔵型MOSFET

図4. SBD内蔵型MOSFET

2.2.3 放熱技術

冷却の際には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ことが一般的であるが、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に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パワー密度実装を実現している。

2.2.4 封止材料

チップ表面の保護やモジュール内部の絶縁を確保する目的で封止材として使用されるシリコーンゲルだが、高温環境では不安定になることがある。Tj > 200°C達成のために、当社ではシリコー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、シリコーンゲルが凝固する-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侵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にも展開していく。

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ルームエアコン市場では、国内のトップランナー基準に基づく省エネルギー性能重視の需要がある一方、中国やインドなどのアジア圏を中心としたコスト重視の需要もあり、今後二極化はますます加速すると考えられる。これに加え、一大マーケットである中国市場で環境規制の高まりからエネルギー効率の低い製品の販売を停止する方向性が出されており、ノンインバータエアコンからの置換需要なども含め、活気ある市場の一つと言える。

高性能需要に対し、エネルギー効率の指標の一つである通年エネルギー消費効率(Annual Performance Factor: APF)で最高レベルの性能をもたらす技術としてSiC MOSFETを搭載した“SiC DIPIPM”を製品化し、損失を1/4にまで低減させた(図5)。一方、ボリュームゾーンとなる普及機へは、“DIPIPM Ver. 7シリーズ”を展開している。従来製品に比べて発生損失の低減及び動作温度範囲の拡大による熱的な設計自由度向上だけでなく、ノイズ特性も改善されており、対策部品の削減などトータルシステムコスト低減に寄与できる(図6)。

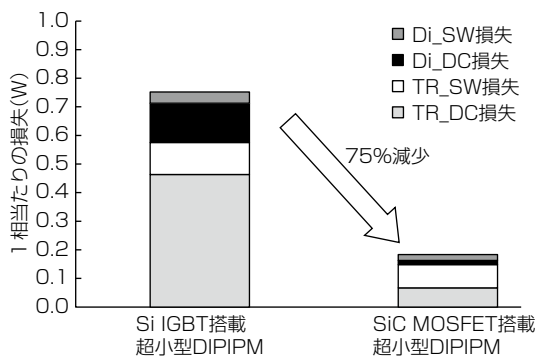


図5. DIPIPMの損失比較

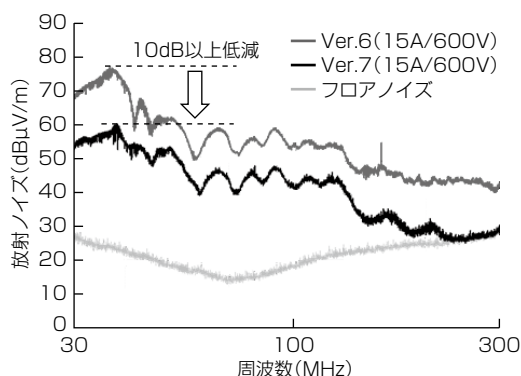


図6. ノイズ特性の比較

洗濯機や冷蔵庫用途には逆導通IGBT(Reverse Conductive IGBT: RC-IGBT)を搭載した“SLIMDIPシリーズ”, ファンモータ用途には“表面実装型IPMシリーズ”を展開している。さらに、パッケージエアコン用途には三相コンバータ、インバータ、ブレーキ回路及びゲート駆動IC, 各種保護回路をオールインにした“DIPIPM+シリーズ”を更に大容量化するなど、白物家電のインバータ化をトータルでサポートしていく。

3.2 産業応用製品

産業応用製品では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、絶縁構造を刷新した。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り量を抑制する技術である(図7)。

このSLC技術の最大の特長は、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が実現できることにある。図8に温度サイクル(条件: -40~125℃: 各1時間保持)の耐量比較結果を示す。従来構造では膨張~収縮による熱起因の機械的ストレスから絶縁基板とベース板を接続するはんだ部分に外周部からクラック(図8(a)で外周部にある黒い箇所がクラック)の進行が確認できる。クラックが更に進行していくと放熱経路を遮断してしまい、

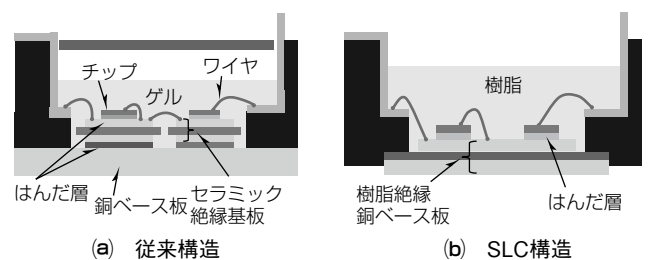


図7. 内部構造の比較

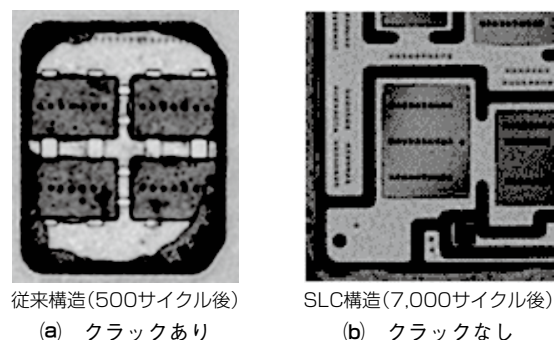


図8. 温度サイクルの耐量比較(超音波探傷画像)

冷却できず破壊にまで至るため寿命設計を行うときに重要なファクタの一つであった。一方、SLC構造では7,000サイクル後でもクラックの前兆は確認できず、非常に高い温度サイクル耐量があることが分かる。

この技術はその他のシリーズにも展開中である。大型インバータや風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギー用途に適した“産業用LV100シリーズ”は市場の高出力化ニーズに応えられるよう、低インダクタンスかつ並列接続が容易な端子配列となっている(図9)。また、IPM“G1シリーズ”は新たに駆動速度切換え機能を搭載し、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、ノイズ低減と損失低減を両立させるなど、ユーザーの使いやすさを追求し続けている。

3.3 自動車応用製品

移動体の宿命でもある 小さく・軽く・力強く との市場ニーズに伴い、パワーモジュールも小型化・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、高パワー密度化要求には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した“J1シリーズ”を製品化した。チップと電極間の接続にはA1ワイヤボンドを使うのが一般的であったが、DLB(Direct Lead Bonding)を用いることで接合面積を大幅に拡大でき、市場からのパワーサイクル寿命の向上要求に応えている(図10)。

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

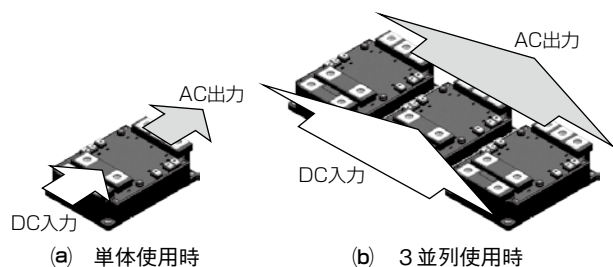


図9. LV100の並列例

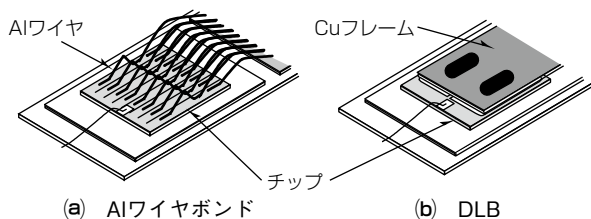


図10. チップと電極間の接続方法

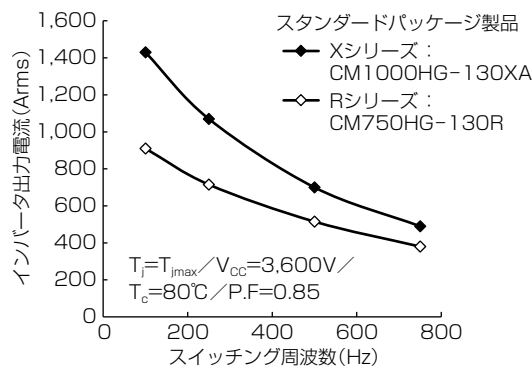


図11. インバータ出力電流比較

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”も追加でラインアップし、さらにSiCチップ化も含め、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

電鉄市場及び洋上風力発電や国際連携直流送電市場では、更なる大容量化・高パワー密度化、パッケージの互換性などの要求があり、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、より高パワー密度を実現するために2素子入りの次世代標準パッケージとなる“Xシリーズ・LV100タイプ/HV100タイプ”を展開している。第7世代IGBTチップ技術とRFCダイオードを採用し、従来比20~30%のパワー密度増加を実現した。動作温度Tjopも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%増加できた(@200Hz動作時)(図11)。

さらにLV100タイプでは3.3kV/750A 2素子入りのSiC製品を開発した。電鉄用途で駆動周波数向上が可能になり、高調波損失の低減などによって大幅なユニットサイズ低減が可能になった。

4. む す び

当社はシリコン素材の第7世代チップ、SiCチップを中心に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、パワーエレクトロニクス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) 島 顕洋, ほか: パワーモジュールの最新動向と展望, 三菱電機技報, 90, No.5, 266~270 (2016)
- (2) 岩田明彦, ほか: パワーエレクトロニクス技術の将来展望, 三菱電機技報, 91, No.7, 368~372 (2017)
- (3) ゴーラブ マジウムダール, ほか: パワーモジュールの最新動向と展望, 三菱電機技報, 92, No.3, 158~162 (2018)