

パワーモジュールの最新動向と展望

Latest Trend and Prospect of Power Module Technology



安田幸央*
Yukio Yasuda



松岡 徹†
Toru Matsuoka

要 旨

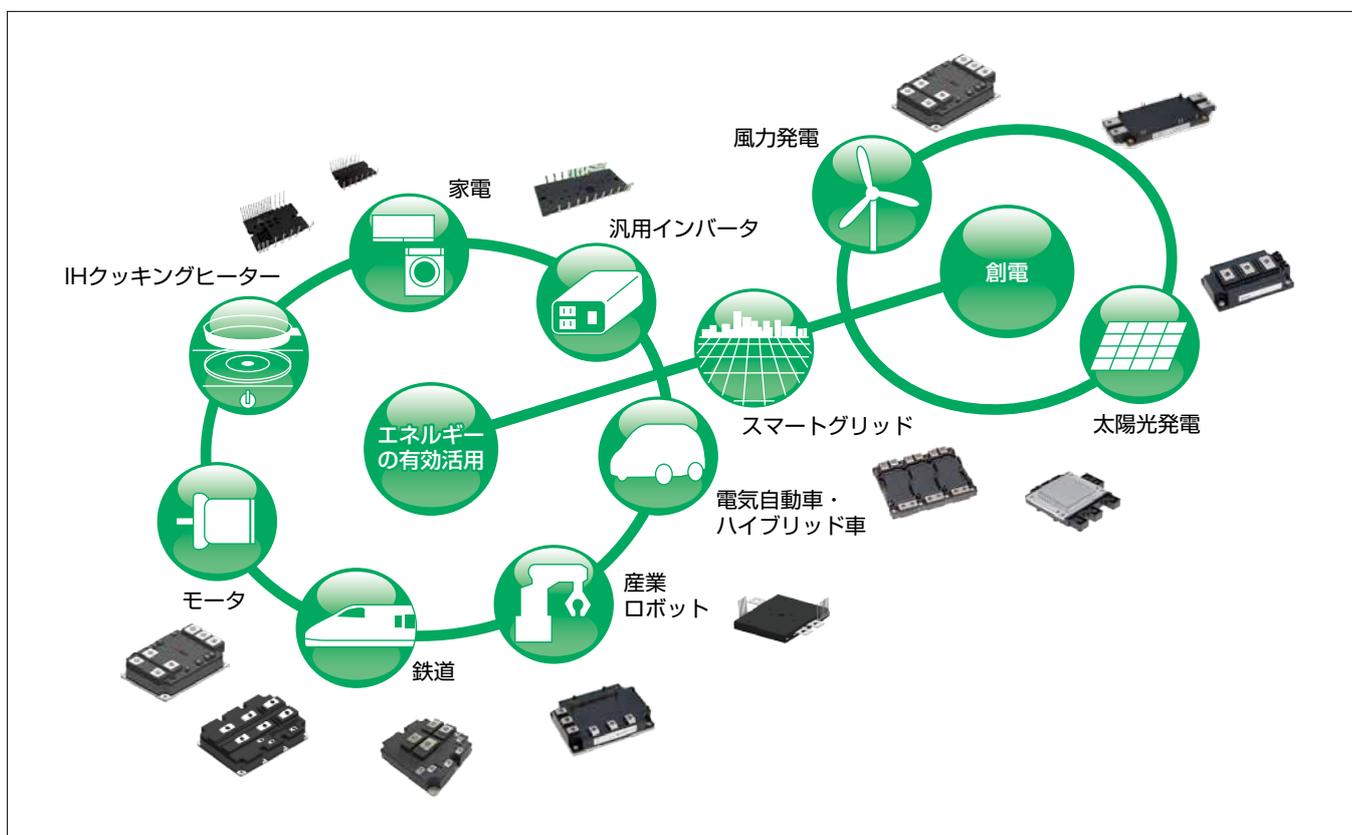
2020年10月に政府から宣言された「2050年までに温室効果ガス排出を全体でゼロにする（いわゆるカーボンニュートラル、脱炭素社会の実現）」によって、あらゆる産業活動が大きく変革し、経済と環境の好循環が生み出されていく新たな転換期を迎えている。

この実現に向け、以前からたゆまぬ努力によって進められてきた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、再生可能エネルギーの有効活用など様々な分野で一層の省エネルギー化を進める必要がある。とりわけ自動車分野では電動化が加速され、ますますの市場拡大が予想されている。

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が提案されるなか、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Si(シリコン)素材に加え、次世代半導体のSiC(シリコンカーバイド)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張している。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。



パワーモジュールの普及・拡大に向けた多様な製品群

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多様化している要求に対応するため、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。

*パワーデバイス製作所長

†同製作所 事業企画プロジェクトグループ サブプロジェクトグループマネージャ

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世代まで進化しており、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。また、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て、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、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し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(Carrier Stored Trench Gate Bipolar Transistor)”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市場に提供してきた。

最新の第7世代チップは第6世代チップ比約10%の特性改善を図りながら、ゲート抵抗によるdv/dt制御性を改善した。また、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。

また、IGBTとFWDを同一チップにした逆導通IGBT(RC-IGBT : Reverse Conductive IGBT)の特性改善も進めている(図1)。RC-IGBTは従来構造のIGBT+FWDに比べてスイッチのオン・オフに伴う温度変化が小さく、モジュールの主要破壊モードの一つであるパワーサイクル寿命の向上も見込め、ユーザーの更なる使いやすさを実現する。

次に、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

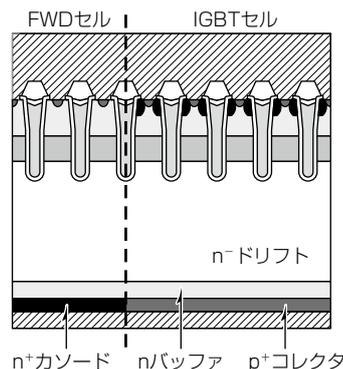


図1. RC-IGBTの断面構造

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	高熱伝導率

注目されているSiCの基本特性を表1に示す。特長的なのは絶縁破壊電界強度がSiの10倍であり、MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)やSBD(Schottky Barrier Diode)などユニポーラ型デバイスの特性改善が大きな恩恵の一つと言える。ユニポーラ型デバイスは高耐電圧化するにはn層を厚くしなければならず導通損失の増大が避けられない。そのためSiでは600Vクラス以上ではIGBTが主流になっていた。しかし、SiC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。ユニポーラ型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形化・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を実現している。

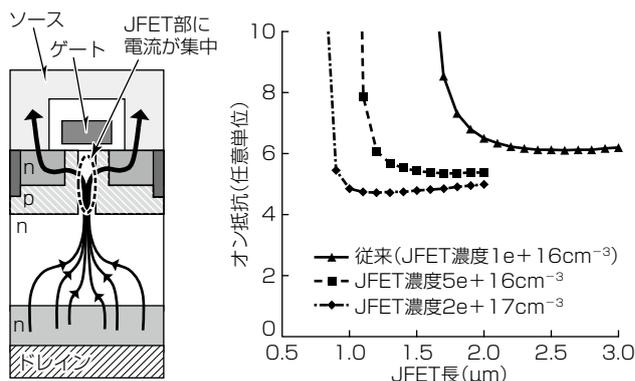


図2. JFET長, オン抵抗, JFET濃度の関係

SiC MOSFETではボディー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によって徐々にオン抵抗が増加する現象があり、回避策としてSBDをFWDとして逆接続する必要がある。次世代技術ではSBDを内蔵したMOSFETの開発を進めており、ボディーダイオードの通電劣化を気にせず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の搭載が不要になるため、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秘めている(図3)。

更なる特性改善に向けてトレンチゲート化の開発も進んでいる。トレンチゲート化の大きな課題の一つにゲート底部の構造が挙げられる。なぜなら、絶縁破壊電界強度がSiの10倍にもなるSiCであるが、トレンチ先端部はSiと同様にSi酸化膜に覆われており、この絶縁破壊耐量を確保するためには過度な電界ストレスを緩和する必要がある。新構造のトレンチゲート型MOSFETは、トレンチゲート底部に三つの注入層(BPW, SC, JD)を設けてこの課題を解決した(図4)。高信頼性用途の要求に耐え得るSiCトレンチゲートMOSFETとして展開していく。

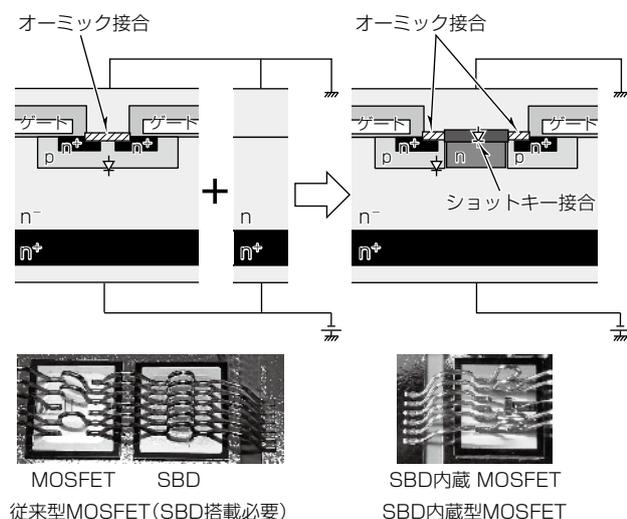


図3. SBD内蔵型MOSFET

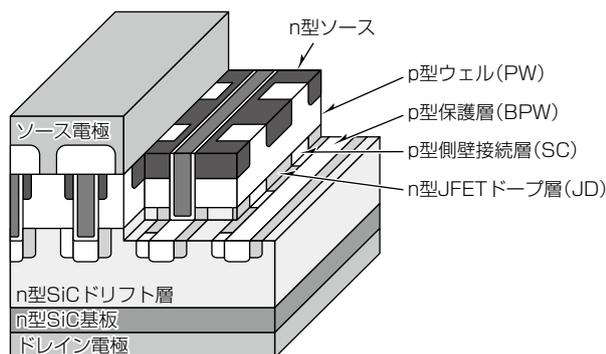


図4. 新構造のトレンチゲート型MOSFETの断面構造

2.2 パッケージ技術

SiベースのIGBTモジュールの $T_j(\max) = 175^\circ\text{C}$ が一般的になっているが、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でも進化が必要になる。

(1) チップ接合技術

環境規制でPb(鉛)の使用が規制された現在、Sn(スズ)合金材料のはんだが主に使用されているが、 $T_j > 200^\circ\text{C}$ 達成のための次世代チップ接合として微細金属パウダーによる金属焼結結合がある。一般的な金属焼結結合では接合時の高温・高圧による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技術の開発を進めている。

(2) ワイヤ配線技術

配線にはAl(アルミニウム)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 $T_j > 200^\circ\text{C}$ 達成のためのCu(銅)ワイヤの使用が進んでいる。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Ni(ニッケル)など堅い金属を使用する必要がある。当社では、銅ワイヤをのしぐ通電能力と、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。

(3) 放熱技術

パワーモジュールは放熱グリースなどを介してヒートシンクに搭載・冷却されるが、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にパワーモジュールと放熱フィンを一体化した。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できる。

(4) 封止材料

チップ表面の保護やモジュール内部の絶縁確保のためにシリコーンゲルを封止材に用いるが、シリコーンゲルは高温環境では構造的に不安定になることがある。この代替技術としてダイレクトポッティング(DP)樹脂封止技術を確立した。DP樹脂は高温環境下での安定性だけでなく、シリコーンゲルが凝固する -50°C 以下の過酷な環境にも耐えることが可能である。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おり、新たな用途への適用が期待される。

3. 市場別のパワーモジュールと展望

3.1 民生用パワーモジュール

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

ン市場では、国内のトップランナ基準に基づく省エネルギー性能重視のような需要がある一方、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。これに加えて、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。

ユーザーは電気特性、放熱特性、絶縁特性とそれらの信頼性を全て実現する形で可能な限りの小型化を追求することになる。民生市場で広く使用されているDIPIPMは単にパワーモジュールを小さくするだけでなく、インバータユニット内での配線がシンプルになり、システム全体が小型になるような端子レイアウトを採用した(図5)。また、保護機能の一部を製品内部に取り込んだIPM(Intelligent Power Module)とし、ユーザーの開発期間の短縮にも貢献できる。

“DIPIPM Ver7シリーズ”では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)。

また、洗濯機や冷蔵庫用途には“SLIMDIPシリーズ”を、ファンモータ用途には表面実装パッケージ型IPM“SOPIPM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

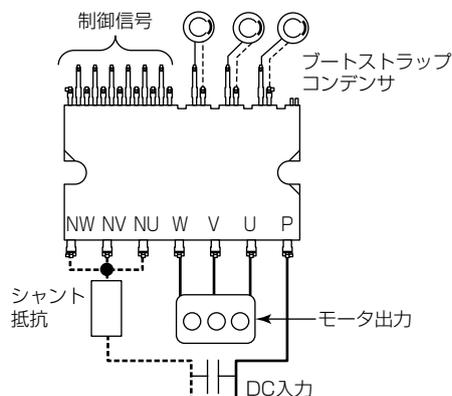


図5. DIPIPMの配線事例

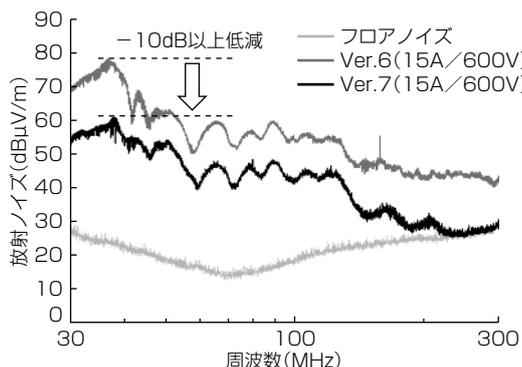


図6. ノイズ特性比較

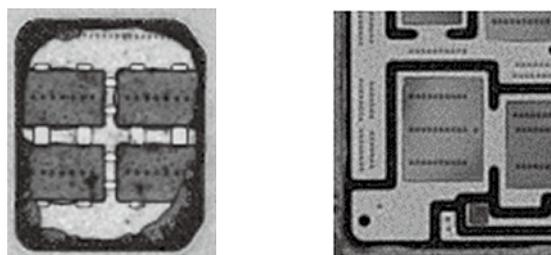
ゲート駆動IC、各種保護回路をオールインにした“DIPIPM+シリーズ”を更に大容量化するなど、白物家電のインバータ化をトータルでサポートしていく。

3.2 産業用パワーモジュール

産業用パワーモジュールでは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、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”を展開している。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て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り、大幅な温度サイクルの長寿命化が実現できる。図7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～収縮による機械的な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7(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、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LV-100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になっている(図8)。また、IPM“G1シリーズ”は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、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。

さらに、電源や溶接機などスイッチング周波数が高い用



(a) 従来構造(500サイクル後) クラックあり (b) SLC構造(7,000サイクル後) クラックなし

図7. 温度サイクル耐量の比較(超音波探傷画像)

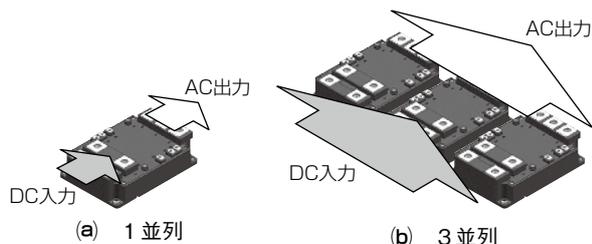


図8. LV-100の並列接続例

途にはSiC製品よりコストパフォーマンスに優れたSi高速仕様の“THシリーズ”や、風力や太陽光発電などの再生可能エネルギー電源のDC1,500V化に対応する“2.0kV Tシリーズ”など、様々な用途に最適な製品を展開している。

3.3 自動車用パワーモジュール

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対応し、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ォーマ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の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。

J1シリーズは放熱グリスを不要にし、パワーモジュール裏面から直接冷却が可能になることで高パワー密度化が可能になり、ユーザーのユニット小型化要求に込えている(図9)。チップと電極間の接続にはAlワイヤボンドを使うのが一般的であったが、DLB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込えている(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

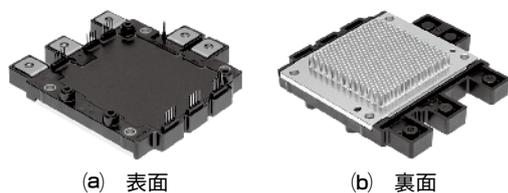


図9. J1シリーズ

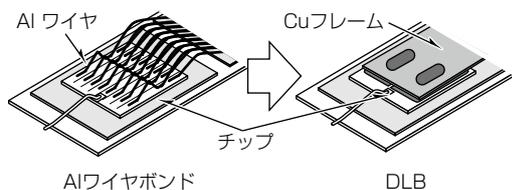


図10. チップと電極間接続方法の変更

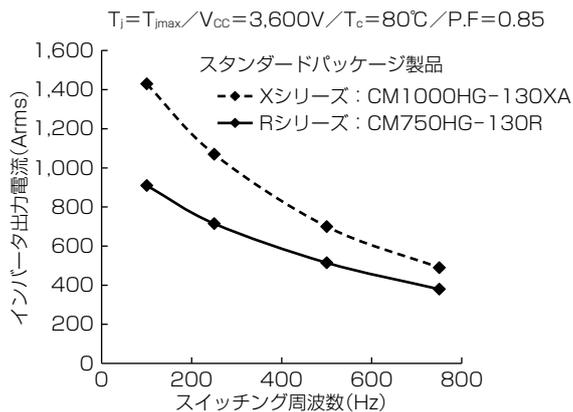


図11. インバータ出力電流の比較

求に込えるため、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・電力用パワーモジュール

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は“Rシリーズ”に比べて50%増加した(@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) 特集：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)
- (2) 特集：パワーモジュールの最新動向と展望，三菱電機技報，94，No.3 (2020)