

第2世代小容量 IPM の系列化

2nd-Generation Small IPM Series

手塚 伸一 TEZUKA, Shinichi

鈴木 啓久 SUZUKI, Yoshihisa

白川 徹 SHIRAKAWA, Toru

モータドライブ機器向けに、第2世代小容量 IPM の定格電流 20 A 品と 30 A 品を新たに系列に加えた。IGBT は第7世代 IGBT チップ技術をベースとし、FWD はドリフト層の厚さとライフタイム制御を最適化することにより、低ノイズ・低損失化を実現するとともに、デバイスの温度上昇を大幅に低減した。適用先として想定される標準的な冷房能力 14 kW のパッケージエアコンの最大負荷時の温度上昇シミュレーションにおいて、第1世代小容量 IPM に比べて約 11℃ 低下しているため、機器の許容出力電流の拡大も可能となる。

Fuji Electric has recently added products with current ratings of 20 and 30 A to our 2nd-generation small IPM series to meet the needs of motor drive devices. Applying the 7th-generation IGBT chip technology as a base and optimizing the lifetime control and drift layer thickness of the FWD, we have significantly reduces the temperature rise while lowering noise and loss. We ran a temperature rise simulation of a package air conditioner that has a standard cooling capacity of 14 kW at the maximum load, which are expected to be actual conditions. It showed 11℃ lower temperatures than the 1st-generation small IPM. It can therefore expand the allowable output current of the devices.

1 まえがき

近年、温室効果ガスの排出量の増加による地球温暖化を防止するため、モータドライブ機器も省エネルギー（省エネ）化が要求されている。中でもエネルギー消費比率が大きいパッケージ（業務用）エアコンについては、2015 年度から「トップランナー制度」が適用され、APF（Annual Performance Factor：通年エネルギー消費効率）の大幅な向上が必要となり、中間負荷領域での高効率化が求められている。さらに、小型化、省スペース化に対応しながら、室外機の運転温度範囲の拡大のために高負荷条件下における損失改善も求められている。

また、産業用の汎用インバータやサーボシステムにおいては、筐体（きょうたい）やフレームのダウンサイジング化が進む一方で、出力容量の拡大に対応するため、これらのシステムの高効率化の要求がさらに高まっている。

富士電機はこれらの要求に対応するため、インバータ方式の小容量モータドライブ用に、小型、低損失、低ノイズを特徴とし、三相インバータブリッジ回路、制御回路および保護回路を内蔵した小容量 IPM（Intelligent Power Module^{(1),(2)}）を製品化してきた。

今回、パッケージエアコン、汎用インバータ、サーボシステムなどのモータドライブ機器における省エネ性能を

さらに向上させるため、第7世代 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）チップ技術⁽³⁾を適用した第2世代小容量 IPM⁽⁴⁾の定格電流 20 A 品と 30 A 品を新たに系列に加えた。

2 製品概要

図1に今回開発した第2世代小容量 IPM の外観を、表1に製品ラインアップと主要特性を示す。

製品の外形寸法は 43×26×3.7（mm）であり、既に量産している 10 A 品や 15 A 品と同一の小型パッケージを採用

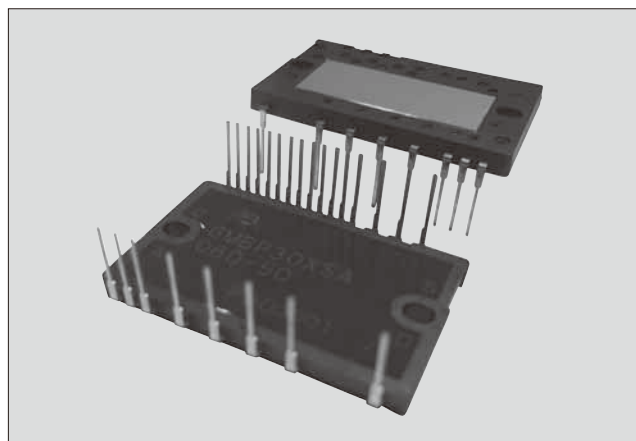


図1 第2世代小容量 IPM

表1 製品ラインアップと主要特性

型名	V_{CE}	I_C	$V_{CE(sat)}$ (typ.)	V_F (typ.)	温度保護機能
6MBP20XSA060-50	600 V	20 A	1.45 V	1.50 V	アナログ温度出力
6MBP20XSC060-50					アナログ温度出力+過熱保護
6MBP30XSA060-50		30 A			アナログ温度出力
6MBP30XSC060-50					アナログ温度出力+過熱保護

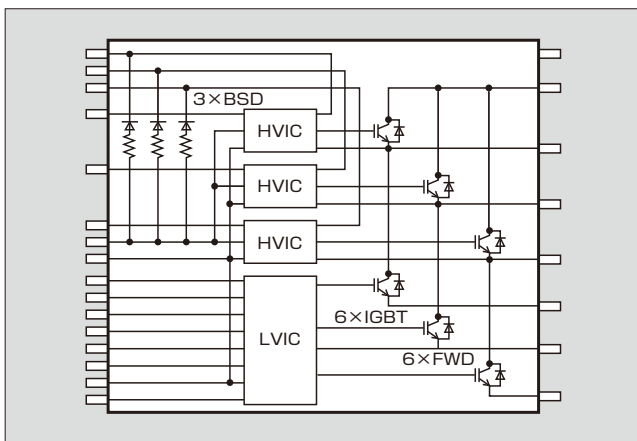


図2 内部等価回路

用し、インバータ基板の小型化に寄与している。

10 A品や15 A品と同様に温度保護機能として、アナログ温度出力のみのもものと、アナログ温度出力に過熱保護を加えたものの2種類をそろえている。

今回開発した20 A品と30 A品は、8~14 kWのパッケージエアコンのコンプレッサ駆動用、および1.0~2.2 kW出力の汎用インバータ、0.4~1.0 kW出力のサーボンプなどに適用可能な製品である。

図2に、内部等価回路を示す。10 A品や15 A品と同様に、第7世代IGBTチップ技術を適用した低損失IGBTと高速FWD (Free Wheeling Diode) で構成する三相インバータブリッジ回路をアルミニウム絶縁基板上に実装している。この三相インバータブリッジ回路のローサイドIGBTを駆動するためのLVIC (Low Voltage Integrated Circuit) を一つ、さらに、ハイサイドIGBTを駆動するためのHVIC (High Voltage Integrated Circuit) を三つ、リードフレーム上に直接実装している。

また、電流制限抵抗を内蔵したBSD (Boot-Strap Diode) を搭載することで、ハイサイドの駆動回路の電源を少ない部品点数で構成できる。

第2世代小容量IPMは、低損失デバイスを採用し、また、動作保証温度 $T_{j(ope)}$ を125℃から150℃に拡大することで、第1世代小容量IPMよりも、インバータ回路の許容出力電流を拡大させ、設計の自由度を向上させている。

3 設計

3.1 デバイス設計

電流容量の拡大に伴い、スイッチング動作時に発生するノイズの増加が懸念されたため、スイッチング損失とノイズのトレードオフを改善する低ノイズ化の設計を行った。

(1) 導通損失の低減

IGBTは、第7世代IGBTチップ技術をベースに、トレンチゲートのセルピッチの配置とゲートしきい値電圧の最適化を行うことで導通損失の低減を図った。

図3に、IGBTのオン電圧とコレクタ電流特性を示す。30 A品の定格電流でのオン電圧は、第1世代小容量IPM

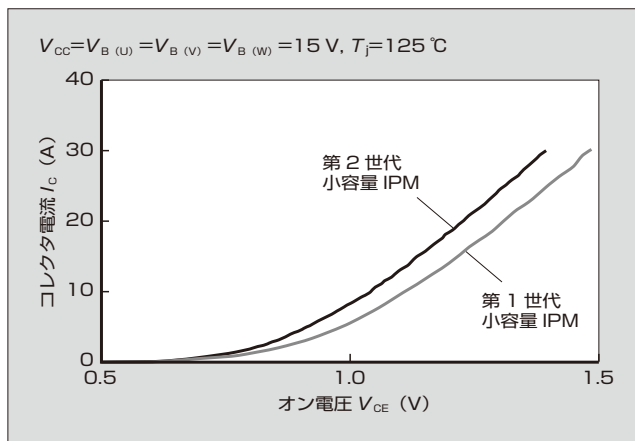


図3 IGBTのオン電圧とコレクタ電流特性

に対して約8%低減しており、また、エアコン用途で重要となるAPFに大きな影響を与える低電流領域のオン電圧は、約7%低減した。

(2) ターンオフ損失の低減

ターンオフ損失を低減するためには、スイッチング速度を高くすればよいが、 dv/dt が急峻(きゅうしゅん)になるため発生ノイズの増加が懸念された。

第2世代小容量IPMでは、 dv/dt は従来の第1世代小容量IPMと同等レベルに抑えながら、IGBTのターンオフで発生するテール電流を抑制し、ノイズとターンオフ損失のトレードオフを改善することとした。テール電流を抑制するために、IGBTのドリフト層の厚さ、フィールドストップ層および裏面pn接合からのキャリア注入量を最適化した。

図4に、IGBTのターンオフ波形の周波数解析による電圧ノイズレベルとターンオフ損失のトレードオフ特性を示す。定格電流30 Aにおいて第1世代小容量IPMに対し、電圧ノイズレベルを同等にしなが、ターンオフ損失を約50%と大幅に低減した。

(3) ターンオン損失の低減

図5に、リカバリー時のスイッチング波形を示す。仮に、第1世代小容量IPMのFWDを使用し、スイッチング速

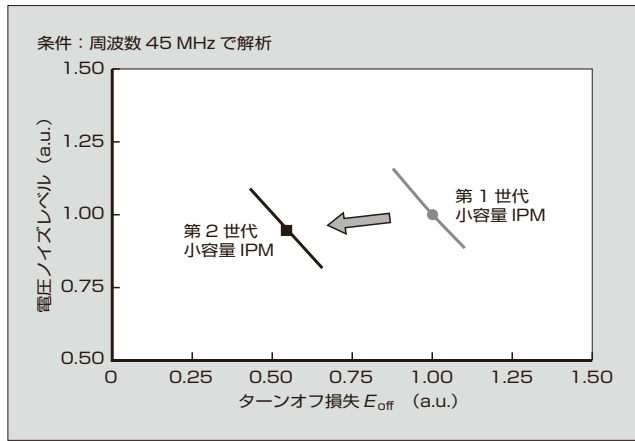


図4 IGBTの電圧ノイズレベルとターンオフ損失のトレードオフ特性

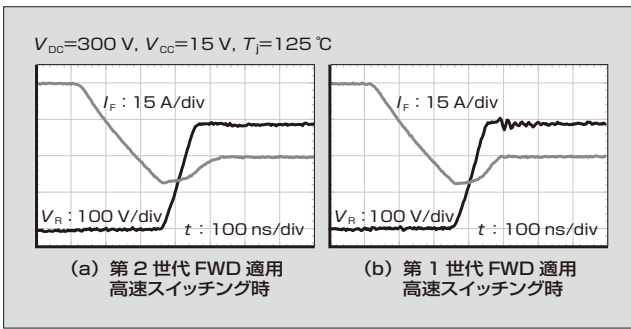


図5 リカバリー時のスイッチング波形

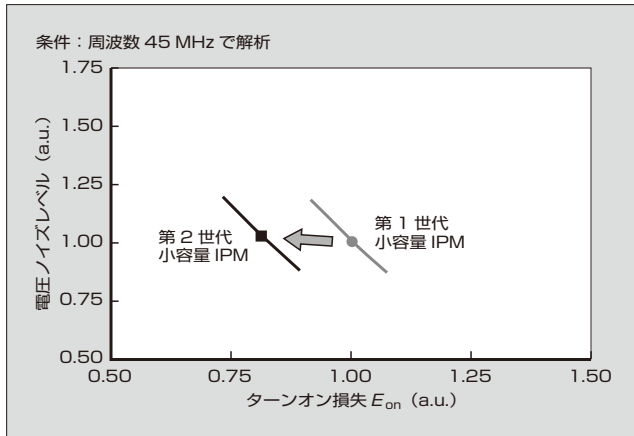


図6 FWDの電圧ノイズレベルとターンオン損失のトレードオフ特性

度を高くしてスイッチング損失を下げた場合、跳ね上がり電圧が増加して発生ノイズが大きくなる。発生ノイズの抑制と同時に、ターンオン損失を低減するためには、リカバリー電流を低減し、跳ね上がり電圧を抑制する必要がある。

図6に、FWDのリカバリー時の電圧ノイズレベルとターンオン損失のトレードオフ特性を示す。今回の製品では、FWDのドリフト層の厚さとライフタイム制御を最適化し、定格電流30Aにおいて、第1世代小容量IPMに対し電圧ノイズレベルを同等としながら、ターンオン損失を約20%低減した。

3.2 制御回路設計

LVICの過熱保護機能は、LVICのジャンクション温度 $T_{j(LVIC)}$ が動作保証値以上にならないように保護するとともに、IGBTの連続動作時の温度上昇によって過熱保護の動作が生じないようにする必要がある。

図7に示すように、第2世代小容量IPMにおいてLVICのジャンクション温度 $T_{j(LVIC)}$ の動作温度範囲の上限は150℃である。また、IGBTが動作保証温度 $T_{j(ope)}$ 上限である150℃に達すると、隣接するLVICの温度は136℃に上昇するため、この温度以下では、過熱保護が動作しないようにする必要がある。そこで、LVICのジャンクション温度の検出のばらつきを抑え、過熱保護範囲を143℃±7℃としている。一方、第1世代小容量IPMでは、LVICのジャンクション温度 $T_{j(LVIC)}$ の動作温度範

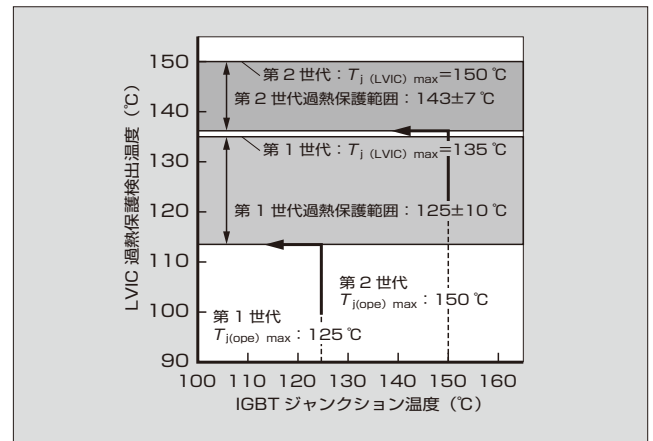


図7 LVIC 過熱保護検出温度とIGBT ジャンクション温度

围の上限は135℃である。また、IGBTの動作保証温度 $T_{j(ope)}$ の上限である125℃に達すると、隣接するLVICの温度は115℃に上昇する。そのため、過熱保護範囲が125℃±10℃であった。このように、第2世代小容量IPMでは、LVICの動作温度範囲を拡大させただけでなく、検出範囲を±7℃以下になるようにIC内部の基準電源回路などを高精度化することにより、IGBTの動作保証温度 $T_{j(ope)}$ を第1世代小容量IPMから25℃拡大した150℃とすることができ、許容出力電流の拡大が可能となった。また、LVICに内蔵しているアナログ温度出力機能の特性値を第1世代小容量IPMと互換性を持たせることで、顧客による保護回路設計の共通化も可能とした。

3.3 パッケージ設計

第2世代小容量IPMは、パッケージエアコン、汎用インバータなどのプリント基板に、はんだで直接接合するパッケージ構造となっている。プリント基板の出力電流が増加すると、外部リード端子の温度が上昇し、はんだ付け部の温度も上昇する。一方、はんだ付け部の信頼性を確保するためには、運転時のはんだ付け部の温度を90~100℃以下に維持する必要がある。そのため、出力電流を制限する必要があった。

図8に、パッケージの断面構造を示す。先に製品化している10A品や15A品と同一となる、アルミニウム絶縁基板側にワイヤで生じるジュール熱を放熱する構造としなが

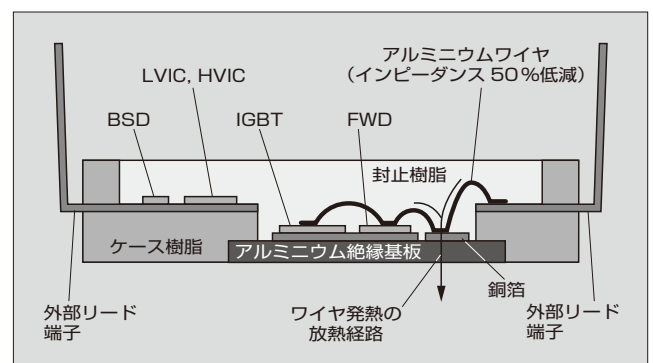


図8 パッケージの断面構造

ら、今回、電流容量の拡大に伴い、外部リード端子の温度上昇を抑制するために、ワイヤのインピーダンスを従来よりも50%下げてジュール熱を低減した。

4 適用効果

パッケージエアコンおよびサーボンプへの定格600V/30A品の適用効果を示す。

図9に、標準的な14kWのパッケージエアコンを想定し、最大負荷時の温度上昇についてシミュレーションを行った結果を示す。

第2世代小容量IPMの最大負荷時の温度上昇は前述の損失低減効果により、第1世代小容量IPMに対して約11℃低下している。さらに、第2世代小容量IPMでは動作保証温度 $T_{j(ope)}$ を第1世代小容量IPMの125℃から150℃に拡大したことにより、動作保証温度 $T_{j(ope)}$ の保証値以下での動作が可能となった。これにより、第1世代小容量IPMでは適用困難であり、1ランク定格電流の大きいIPMが必要であった出力容量のエアコンへの適用が可能となる。

図10に1.0kW出力のサーボンプにおける加速・減速

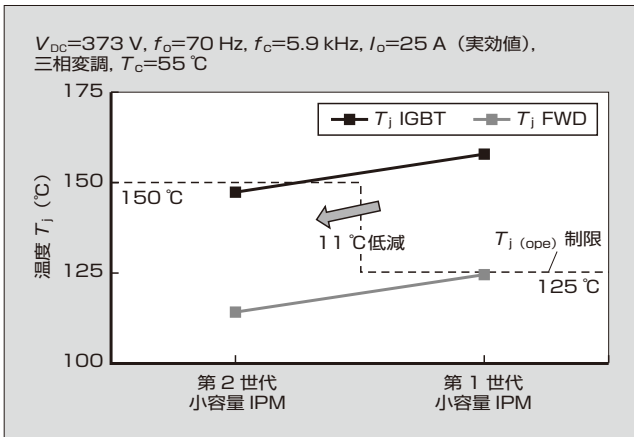


図9 パッケージエアコンにおける最大負荷時の温度上昇シミュレーション結果

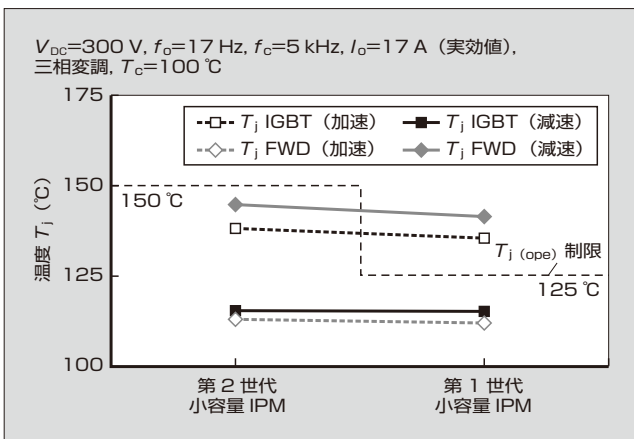


図10 サーボンプにおける加速・減速動作時の温度上昇シミュレーション結果

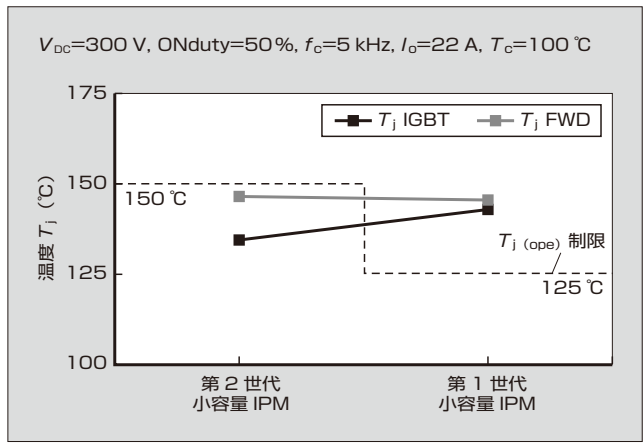


図11 サーボンプにおけるモータロック動作時の温度上昇シミュレーション結果

速動作時の温度上昇シミュレーションの結果を、図11にモータロック動作時の温度上昇シミュレーションの結果を示す。

第2世代小容量IPMの加速・減速動作およびモータロック動作を行った際の温度上昇は、第1世代小容量IPMとほぼ同じ値である。しかし、第2世代小容量IPMにおける動作保証温度 $T_{j(ope)}$ を第1世代小容量IPMにおける125℃から150℃に拡大したことにより、動作保証温度 $T_{j(ope)}$ の保証値以下での動作が可能となる。これにより、第1世代小容量IPMでは適用困難であり、1ランク定格

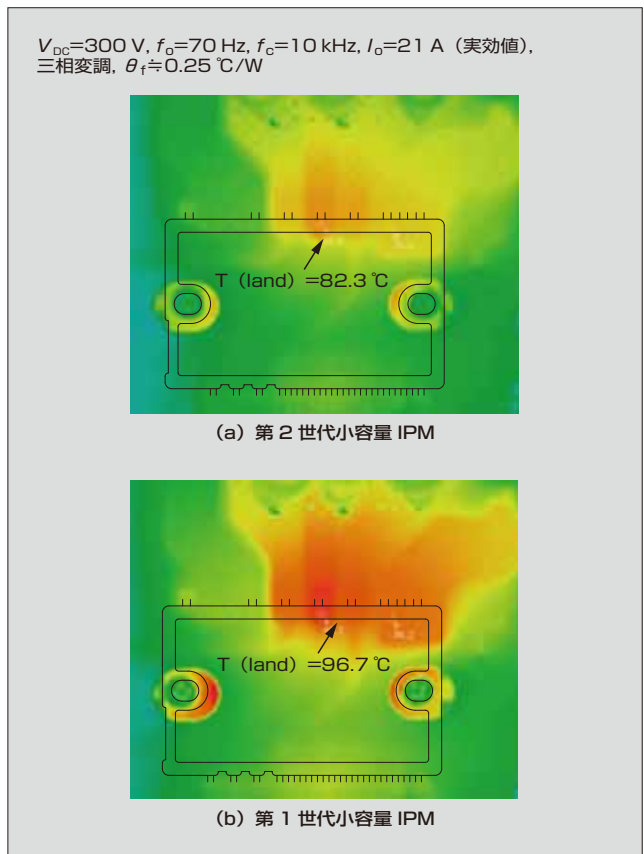


図12 パッケージエアコンにおけるPWM動作時のはんだ付け部温度測定結果

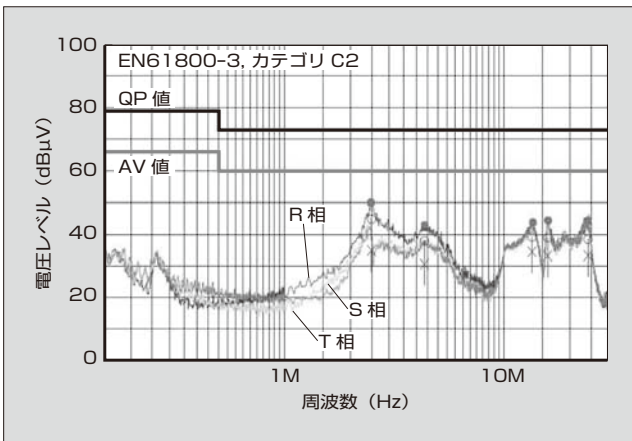


図13 サーボアンプにおける伝導ノイズ評価結果

電流の大きいIPMが必要であった出力容量のサーボアンプへの適用が可能となる。

図12に、600V/30A品を搭載したパッケージエアコンがPWM(Pulse Width Modulation)で定常動作を行っているときのプリント基板はんだ付け部の温度を測定した結果を示す。第2世代小容量IPMは、デバイスの低損失化とパッケージの外部リード端子部の温度上昇の抑制効果により、第1世代小容量IPMよりも、はんだ付け部の温度は約14℃低下している。その結果、はんだ付け部の温度上昇を抑制できることから許容出力電流は約19%拡大する。

図13に、0.75kW出力のサーボアンプに適用したときの伝導ノイズの評価結果を示す。EN61800-3カテゴリC2の限度値(QP値)以下であり、前述の温度上昇の抑制効果と合わせて低ノイズ特性を実現している。

5 あとがき

本稿では、第2世代小容量IPMの系列化として、電流容量を拡大した20A品と30A品について述べた。本製品は、既に量産を開始した10A品や15A品と同様に、第7

世代IGBTチップ技術をベースに最適化した低ノイズで低損失のデバイスを採用することで、インバータ制御のモータドライブ機器における省エネルギー化を実現できる。

今後も、モータドライブ機器の省エネルギー性能の向上に貢献できる製品を開発していく所存である。

参考文献

- (1) Yamada, T. et al. "Novel Small Intelligent Power Module For RAC", proc. 2012 PCIM Asia.
- (2) 山田忠則ほか. インバータエアコン用小容量IPM. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.430-434.
- (3) T. Heinzl, et al. "The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems", Proceeding of PCIM Europe 2015, p.359-367.
- (4) 荒木龍ほか. 第2世代小容量IPM. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.259-263.



手塚 伸一

ディスクリットパワーデバイス、小容量IPMの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部ディスクリット・IC技術部。



鈴木 啓久

ディスクリットパワーデバイスおよび小容量IPM用FWDチップの設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部デバイス開発部。



白川 徹

ディスクリットパワーデバイスおよび小容量IPM用IGBTチップの設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部デバイス開発部。



*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。