

第2世代小容量 IPM

2nd-Generation Small IPM

荒木 龍 ARAKI, Ryu

白川 徹 SHIRAKAWA, Toru

小川 裕貴 KOGAWA, Hiroki

富士電機は、モータドライブシステムの構築に必要なパワーデバイスや制御 IC などを 1 パッケージに集積した小容量 IPM を開発している。さらなる省エネルギー化を図るため、第 7 世代 IGBT 技術をベースに第 2 世代小容量 IPM を開発した。5.6 kW のエアコンを想定した中間負荷領域において第 1 世代に対して 10% 以上の低損失化を実現し、定格・最大負荷領域においても 20% 以上の低損失化を実現した。回路基板のはんだ付け部の温度上昇も第 1 世代と比較して約 20℃ 低減しており、省エネルギーの実現、出力電流の拡大、回路基板実装時の信頼性およびシステム設計の自由度が向上している。

Fuji Electric has been developing small intelligent power modules (IPMs) that integrate into a single package the power devices and control IC needed in the system construction of motor drives. We have now developed a 2nd-generation small IPM based on 7th-generation IGBT technology to achieve even more energy savings. The module reduces the loss by 10% or more in the intermediate load region, such as in the case of a 5.6 kW air conditioner, and by 20% or more in the rated and maximum load region compared with the 1st-generation module. In addition, temperature rise in the soldering on the circuit board has also been reduced by approximately 20°C compared with the 1st-generation module. Overall, the module achieves enhanced energy savings, expands output current, and increase reliability during circuit board mounting and a greater degree of freedom during system design.

1 まえがき

近年、地球環境問題への関心が高まる中、エアコン、洗濯機などの家電製品や産業用モータドライブシステムの省エネルギー（省エネ）に対する要求が強まっている。

家電製品においては、世界的に実使用に近いエネルギー消費効率を表す APF (Annual Performance Factor) による省エネ規制が強化され、定格・最大負荷時の高効率化だけでなく、より実使用に近い中間負荷時の損失改善が重要となっている。特に、日本市場や中国市場などはハイエンド機だけでなく、ボリュームゾーンとなる普及機でも省エネ性能の大幅な向上が必要となってきた。

また、産業用インバータやサーボにおいては、電力の高密度化による筐体（きょうたい）のダウンサイジングの要求が強まっている。

これらの要求に応えるため、富士電機はモータドライブシステムの構築に必要なパワーデバイスや制御 IC などを一つのパッケージに集積した小容量 IPM (Intelligent Power Module) を製品化してきた^{(1),(2)}。小容量 IPM は、三相インバータブリッジ回路と制御・保護回路を内蔵し、インバータ機器の小型化および省エネに貢献してきた。

今回、各アプリケーションにおいてさらなる省エネ化を図るため、第 1 世代小容量 IPM を継承し、薄ウェーハ化と微細化を融合した第 7 世代 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 技術⁽³⁾をベースに、第 2 世代小容量 IPM を開発した。

2 製品概要

図 1 に第 2 世代小容量 IPM の外観を、表 1 に製品ラインナップと主要特性を示す。第 2 世代小容量 IPM は、外

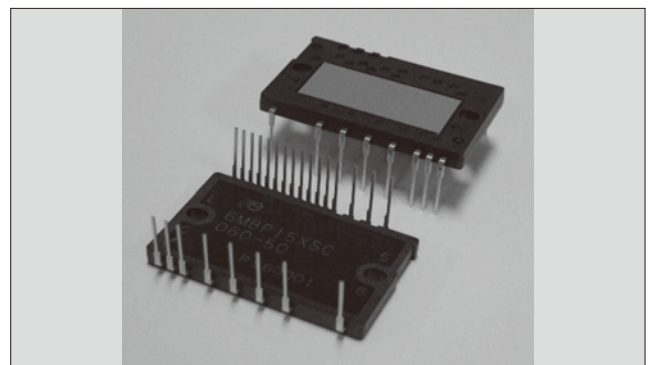


図 1 第2世代小容量 IPM

形サイズとピン配置が第 1 世代品と同一の互換パッケージ構造としている。ラインアップは 600 V/10 ~ 30 A であり、エアコンの入力電力 1.5 kVA のコンプレッサ向けに、および 0.1 ~ 0.2 kW 出力の小容量の産業用インバータやサーボ向けに新たに 10 A 定格を加えた。温度保護機能がアナログ温度出力のみのもものと、過熱保護を加えたものの 2 種類がある。

図 2 に小容量 IPM の内部等価回路の構成を示す。小容量 IPM は、低損失 IGBT と高速 FWD (Free Wheeling Diode) からなる三相インバータブリッジ回路を絶縁金属基板上に搭載している。この三相インバータブリッジ回路のローサイドの IGBT を駆動するための LVIC (Low Voltage Integrated Circuit) と、ハイサイドの IGBT を駆動するための HVIC (High Voltage Integrated Circuit) を搭載している。また、ハイサイドのドライブ回路用に電流制限抵抗を内蔵した BSD (Boot-Strap-Diode) を搭載することにより、少ない外付け部品数で絶縁電源を構成することができる。

第 2 世代小容量 IPM は、第 1 世代に対して大幅に損

表1 製品ラインアップと主要特性

電圧	型式名	I_C	I_{CP}	$V_{CE(sat)}$ (typ.)	V_F (typ.)	温度保護機能
600 V	6MBP10XSA060-50	10 A	30 A	1.40 V	1.40 V	温度センサ出力
	6MBP10XSC060-50					温度センサ出力 & 過熱保護
	6MBP15XSA060-50	15 A	45 A	1.40 V	1.40 V	温度センサ出力
	6MBP15XSC060-50					温度センサ出力 & 過熱保護
	6MBP20XSA060-50	20 A	60 A	1.40 V	1.55 V	温度センサ出力
	6MBP20XSC060-50					温度センサ出力 & 過熱保護
	6MBP30XSA060-50	30 A	90 A	1.40 V	1.45 V	温度センサ出力
	6MBP30XSC060-50					温度センサ出力 & 過熱保護

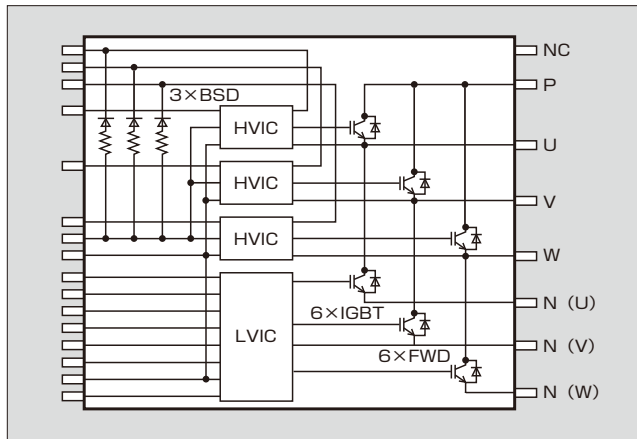


図2 内部等価回路の構成

失を低減するとともに、動作保証温度範囲を 125℃ から 150℃ に拡大した。さらに、過熱検知レベルの最適化と過電流検出精度の向上により、インバータの設計自由度の向上と動作領域の拡大を実現した。

3 特徴

表2 に第2世代小容量 IPM の特性を示す。特徴は次のとおりである。

(1) 低損失化による APF の向上

第7世代 IGBT 技術をベースにした低損失デバイスとドライブ能力の最適化により、大幅な低損失化を実現し、APF を向上することが可能となる。

(2) インバータの設計自由度向上と動作領域の拡大

動作保証温度 $T_{j(ope)}$ の高温化により許容電流を増やすことができ、動作領域の拡大が可能となる。また、ピークコレクタ電流の定格を拡大し、短絡検出を高精度にすることで、起動時など瞬時に大電流が流れる過負荷運転領域の拡大が可能となる。これにより、同定格にてワンランク上のモータ容量に対応することができる。

(3) 熱抵抗低減

熱伝導率を第1世代小容量 IPM の約 1.5 倍に向上させた高放熱アルミニウム絶縁基板を採用し、熱抵抗を低減した。これにより、ジャンクション温度の上昇を抑制し、低損失化と合わせて許容電流が拡大した。

表2 第2世代小容量 IPM の特性

項目	第2世代	第1世代
型式	6MBP15XSC060-50	6MBP15 VSC060-50
V_{CE}	600 V	600 V
I_C	15 A	15 A
I_C (pulse)	45 A	30 A
$T_{j(ope)}$	-40 ~ +150 °C	-40 ~ +125 °C
$V_{CE(sat)}$ (typ.)	1.40 V	1.80 V
E_{off} (typ.)	0.26 mJ	0.56 mJ
V_F (typ.)	1.40 V	1.65 V
短絡保護検出精度	480 ± 25 mV	480 ± 50 mV
温度保護	温度センサ出力 & 過熱保護 (143 ± 7°C)	温度センサ出力 & 過熱保護 (125 ± 10°C)

3.1 デバイス設計における特徴

(1) 低損失パワーデバイス設計

図3 に IGBT 断面構造の比較を示す。第7世代 IGBT デバイスはこれまで培ってきたフィールドストップ (FS) 構造を基本とし、さらなる薄ウェーハ化と微細化技術を融合させている。

第2世代小容量 IPM 用に、この第7世代 IGBT 技術を

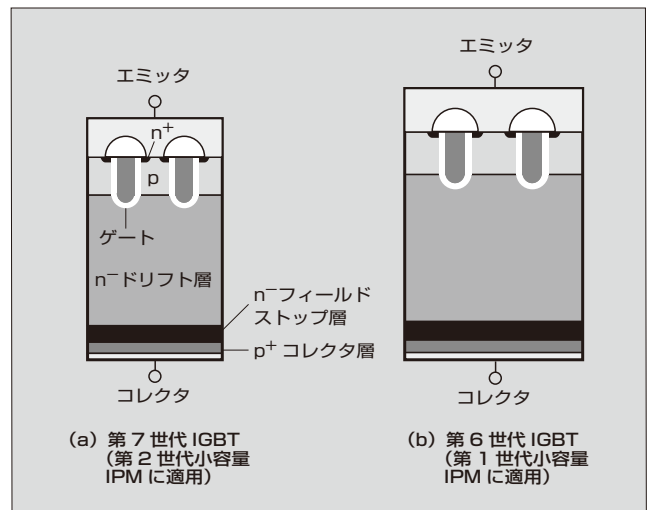


図3 IGBT 断面構造

ベースにドリフト層の比抵抗と厚さの最適化を行い、さらにFS層のプロファイルと、表面チャンネル密度および配置の最適化を行うことで、 $V_{CE(sat)}$ 特性と E_{off} 特性のトレードオフを改善している。

図4に第1世代小容量IPMとの $V_{CE(sat)}$ 特性と E_{off} 特性のトレードオフの比較を、図5にターンオフ波形の比較を示す。 $V_{CE(sat)}$ 特性と E_{off} 特性のトレードオフは、第1世代に対し、 $V_{CE(sat)}$ は約25%改善し、 E_{off} は薄ウェーハ化によるテール電流低減により約50%の低損失化を実現した。これにより、中間負荷時の損失低減による省エネ指標であるAPFの改善と、最大負荷時の大幅な損失低減による許容電流拡大を可能とした。

(2) 過電流検出精度向上

図6に、IPM (Interior Permanent Magnet) モータにおける過電流保護レベルの比較を示す。エアコンのコンプレッサで使用されるIPMモータでは、大出力時のモータの減磁耐量を確保する必要がある。このためには、過負荷領域での過電流保護が重要であり、動作領域を拡大するためには、過電流保護の検出ばらつき精度が大きく寄与する。

第2世代小容量IPMでは、過電流保護の検出精度の範囲を第1世代の10%から5%に半減することで、モータの特性を限界近くまで引き出して、最大負荷運転時の電流を約13%増加することができる。

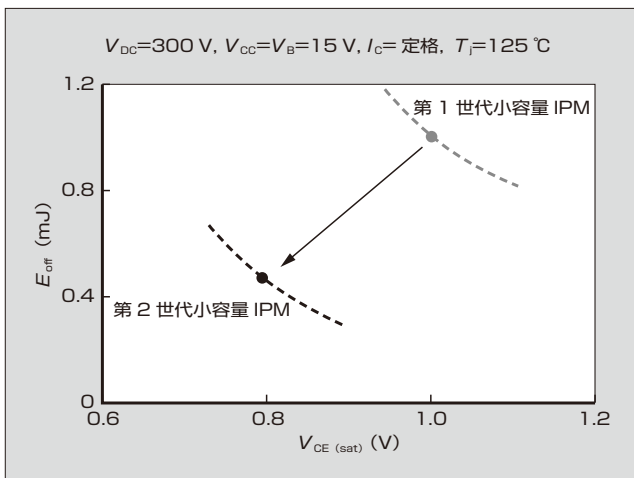


図4 $V_{CE(sat)}$ 特性と E_{off} 特性のトレードオフ

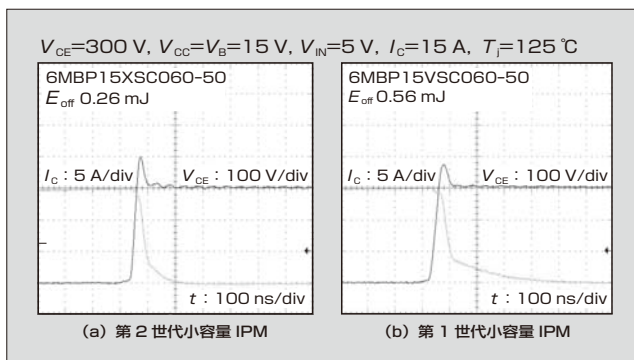


図5 ターンオフ波形

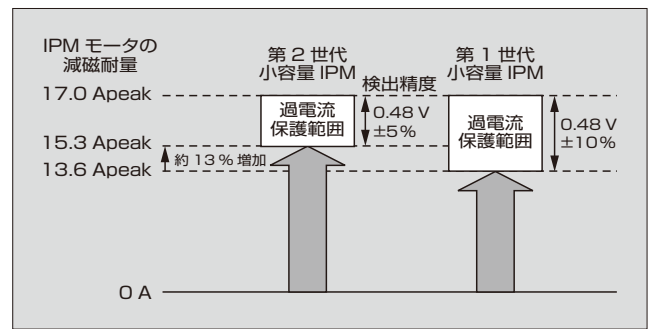


図6 過電流保護レベルの比較

3.2 パッケージ設計における特徴

(1) 高温動作保証

前述の動作保証温度 $T_{j(ope)}$ を高温化する上で、実使用を考慮したパワーサイクル耐量などの信頼性向上が必要である。

そのために、第2世代小容量IPMでは、高温動作におけるパッケージ構成部材の熱応力を抑制するため、ワイヤ接合部の熱疲労を抑制してパワーサイクル耐量の向上を図っている。これにより、 $T_{j(ope)}=150^{\circ}\text{C}$ を想定したパワーサイクル試験 ($\Delta T_j=100^{\circ}\text{C}$) において、15kcycle以上を満足している。

(2) 温度上昇抑制

動作領域の拡大に伴い、許容電流を拡大させるためには、パッケージの熱抵抗を低減してパワーデバイスの温度上昇を抑制することが必要である。

図7にパッケージの断面構造を示す。小容量IPMは、端子ケースに高放熱アルミニウム絶縁基板を採用した構造としており、その改良を行った。アルミニウム絶縁基板の低熱抵抗化と、絶縁耐圧の確保を両立することが課題である。そこで、パッケージ熱抵抗特性の大半を決めるアルミニウム絶縁基板内の絶縁層の厚みと、絶縁耐圧とのトレードオフに着目し、最適化を行った。

また、許容電流を拡大するに当たり、実装する回路基板のはんだ付け部の温度上昇の抑制も課題となる。そこで、第2世代小容量IPMは、はんだ付け部の温度上昇を抑制するためにパッケージ内部のワイヤの発熱をアルミニウム絶縁基板側にも放熱させる構造とした。電流通電時に発生

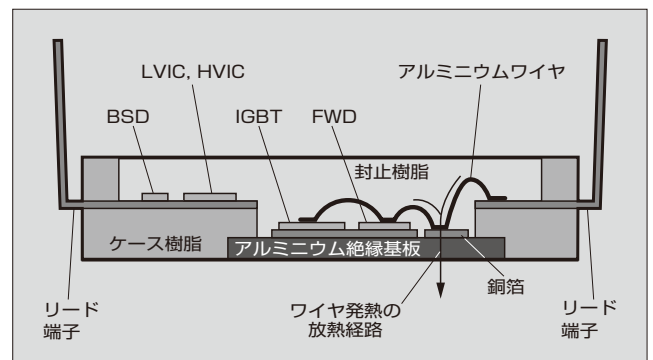


図7 パッケージの断面構造

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

するワイヤのジュール熱をアルミニウム絶縁基板側に放熱させることで、温度上昇を抑制している。

4 適用効果

図8に、0.75kWの産業用インバータを想定し、150%過負荷条件における損失を試算した結果を示す。第2世代小容量IPMは第1世代に対し、約20%低損失化している。これによりワンランク上の1.0kWインバータへの適用拡大が可能である。

また、図9に600V/15AのIPMを適用した5.6kW出力のエアコンを想定して、各動作モードにおける損失を試算した結果を示す。第2世代小容量IPMは全負荷範囲において、第1世代に対して低損失である。特にAPF性能に影響を与える中間負荷領域において、10%以上損失が低い。

さらに、定格・最大負荷領域においても、20%以上損失が低いので、15A定格においてワンランク上の7.2kWエアコンへの適用が可能となる。

図10に、エアコンの定常運転に相当するPWM動作時の温度上昇を評価した結果を示す。第2世代小容量IPMは、低損失と温度上昇の抑制に合わせて動作保証温度を拡大($T_{j(ope)}=150^{\circ}\text{C}$)したことにより、許容出力電流は第

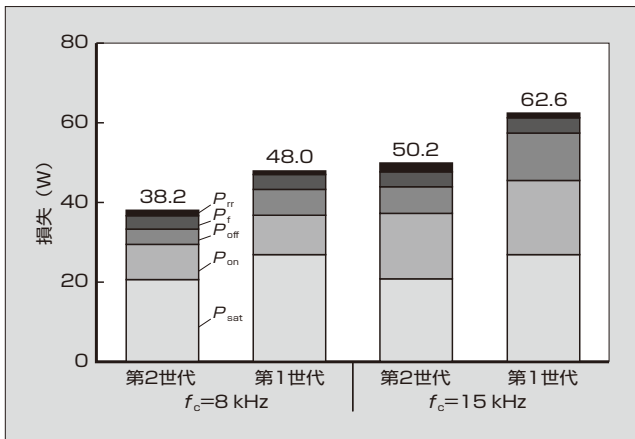


図8 0.75kW 産業用インバータの損失試算結果

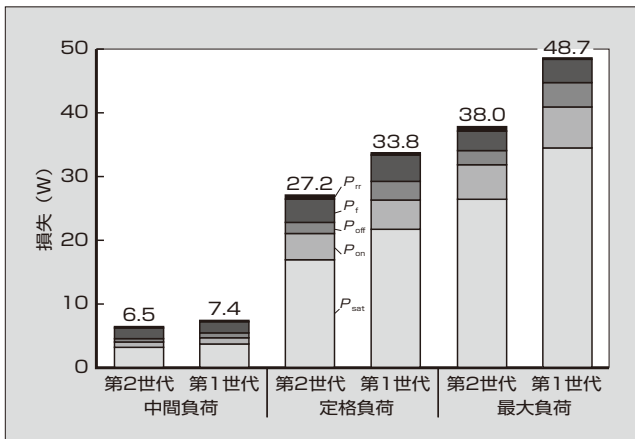


図9 5.6kW エアコンの損失試算結果

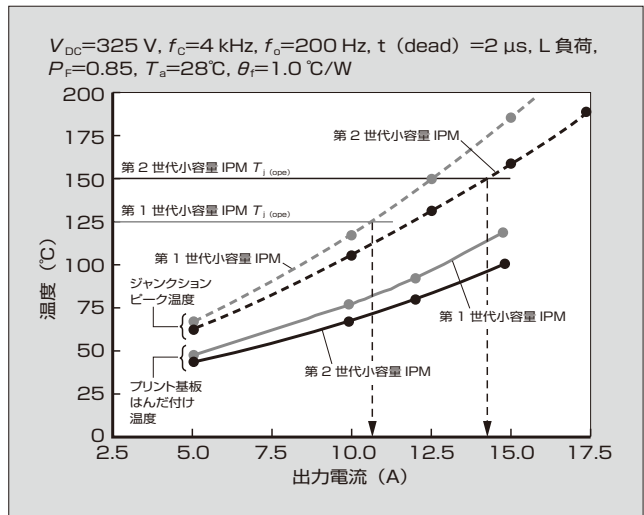


図10 PWM動作時の温度上昇の評価結果

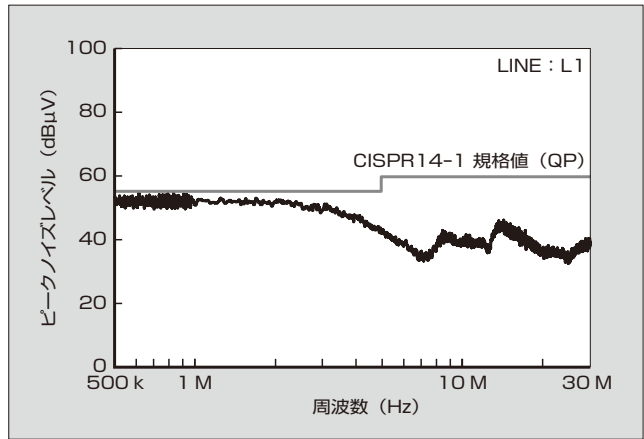


図11 5.6kW エアコンの伝導ノイズ評価結果

1世代に対して約25%拡大した。

また、回路基板のはんだ付け部の温度上昇も第1世代と比較して約20℃低減しており、出力電流が拡大するとともに回路基板実装時の信頼性が向上し、設計自由度も向上する。

図11に、5.6kW出力のエアコンに実装した場合の伝導ノイズの評価結果を示す。500kHzから30MHzまでの周波数領域において、CISPR14-1規格のQP(準尖頭値)の許容値をクリアし、前述の損失低減と合わせて、低ノイズであることも確認している。

5 あとがき

本稿では、第2世代小容量IPMの特徴について述べた。第2世代小容量IPMは、第7世代IGBT技術をベースに最適化されたIGBTデバイスを適用することにより大幅な低損失化を実現し、システムの省エネルギー化に貢献する製品である。また、動作保証温度の拡大と熱抵抗の低減により許容電流が拡大する。これにより、適用容量の拡大にも寄与し、システムの設計自由度が向上できる製品である。

今後も、さらに差別化した製品ラインアップにて、シス

テム全体での省エネルギー化を実現す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.



荒木 龍

ディスクリートパワーデバイス、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パワー半導体事業統括部ディスクリート・IC技術部。



白川 徹

ディスクリー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。



小川 裕貴

ディスクリート、ICおよび小容量IPMのパッケージ開発に従事。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パッケージ実装開発部。





*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。