

RC-IGBT を搭載した第 7 世代 IGBT-IPM の小型製品の系列化

Line-Up of Compact 7th-Generation IGBT-IPMs that Use RC-IGBTs

黒澤 英二 KUROSAWA, Eiji

城塚 直彦 JOZUKA, Naohiko

唐本 祐樹 KARAMOTO, Yuki

富士電機は、電力変換装置のさらなる小型化、高信頼性の要求に応えるため、RC-IGBT チップを搭載した新小型パッケージ「P639」を適用した第 7 世代 IGBT-IPM の系列化を行った。この製品は、第 6 世代 IGBT-IPM の「P629」に比べ、設置面積を 27% 縮小した。また、第 7 世代チップ技術と IGBT のゲートを駆動する新たな制御技術を採用することにより、連続動作時の発生損失を約 7% 低減した。さらに、第 7 世代のパッケージ技術を適用し、150°C での高温動作化を実現した。

In order to meet the demand for further miniaturization and higher reliability in power conversion systems, Fuji Electric has developed a line-up of 7th-generation IGBT-IPMs that is equipped with RC-IGBT chips and utilize the new compact “P639” package, the footprint of which is 27% smaller than the “P629” package used for 6th-generation IGBT-IPMs. In addition, using the 7th-generation chip technology and new control technology for driving the gates of the IGBTs has reduced generated losses during continuous operation by 7%. Moreover, it utilizes the 7th-generation packaging technology to achieve high-temperature operation at 150°C.

① まえがき

近年、ファクトリーオートメーション化や携帯電話などの通信機器の普及により、産業用ロボットや工作機械などに使用されるサーボシステムの需要が拡大している。こうした装置に強く求められるのが省スペース化であり、これを実現するためには、そこに使われるパワー半導体も小型化することが必要であり、高温動作化と低損失化が鍵となる。また、突然の故障を防止するため高信頼性であることも求められている。

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) -IPM (Intelligent Power Module) は、IGBT のゲートを駆動する制御 IC を内蔵し、さらに保護機能も備えた IGBT モジュールであり、高信頼性が要求される Numerical Control (NC) 工作機、ロボット、エレベータなど、用途は多岐にわたっている。

最新世代である第 7 世代 IGBT-IPM⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾は、低損失化を実現するために、IGBT のトレンチゲート構造の微細化と薄ウェーハ加工技術によりドリフト層を薄化した第 7 世代チップ技術に加え、IGBT のゲートを駆動する新たな制御技術を採用した。さらに第 7 世代パッケージ技術である高耐熱ゲルや高信頼性はんだなどの適用により、高温動作化を実現した。今回、さらなる小型化、高信頼性の要求に応えるため、第 7 世代 IGBT-IPM の既存系列に、RC-IGBT (逆導通 IGBT : Reverse Conducting IGBT) チップ⁽⁵⁾を搭載した新小型パッケージ「P639」を適用した製品を加えた。本製品は、高放熱性と IGBT チップの特性を直接検出する高精度な保護機能を兼ね備えており、IGBT-IPM としては、業界トップクラスの小型化を実現した製品であり、適用機器の小型化に貢献する。

② 特徴

2.1 製品の概要

図 1 に新小型パッケージ P639 の外観を示す。P639 パッケージの外形寸法は D36.0×W70.0×H12.0 (mm) であり、回路構成は三相インバータ回路を一つのモジュールに集積した 6 in 1 となっている。P639 は RC-IGBT チップを搭載することにより小型化を実現した。

表 1 に 650 V/50 A、1,200 V/25 A 以下の定格における、第 7 世代 IGBT-IPM と従来の第 6 世代 IGBT-IPM の製品ラインアップを示す。第 6 世代 IGBT-IPM では、一世代前の IGBT チップを採用した「P629」パッケージのみのラインアップであったが、第 7 世代 IGBT-IPM では、より小型の P639 パッケージをラインアップし、適用機器の小型化に貢献する。

図 2 に P629 と P639 の外形の比較を示す。P639 の設置面積は、P629 に対して 27% 縮小した。さらに、主端

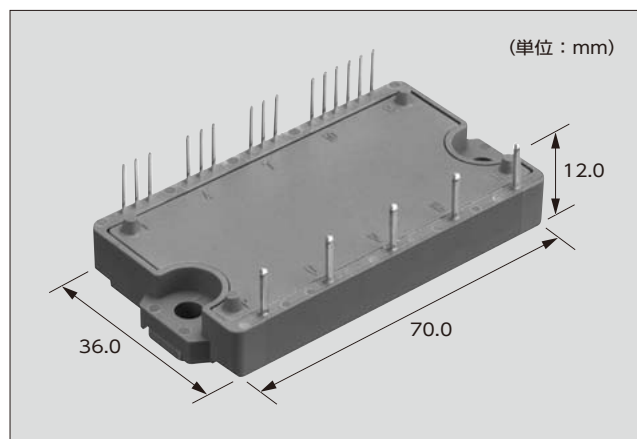


図 1 新小型パッケージ「P639」

表 1 製品ラインアップ

定格		第6世代 IGBT-IPM	第7世代 IGBT-IPM
650 V	1,200 V		
20 A	10 A	P629	
30 A	—	P629	
50 A	25 A		

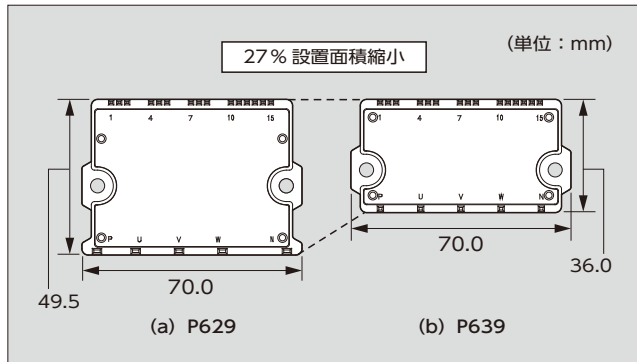


図2 「P629」と「P639」の外形の比較

子、制御端子の配列は P629 と同一となっており、置換えが容易である。

P639 を用いた第 7 世代 IGBT-IPM は、第 7 世代チップ技術とそれを駆動する新たな制御技術によって、第 6 世代 IGBT-IPM に対して、発生損失を約 7% 低減した。さらに、第 7 世代パッケージ技術によって高温動作化を実現した。また、RC-IGBT チップを適用することにより、低周波動作時のチップ温度変化量を低減することができ、第 6 世代 IGBT チップと FWD (Free Wheeling Diode) チップを搭載した製品に対し ΔT_{vj} パワーサイクル寿命が向上した。

2.2 製品の特徴

(1) パッケージの小型化

従来の P629 は、チップ搭載面積が約 30% を占めており、パッケージの小型化を実現するためにはチップ面積を縮小することが重要となる。ただし、チップ面積を縮小するとチップ特性の悪化や熱抵抗の上昇に加えて、信頼性を確保する上で必要なアルミニウムワイヤ本数の確保が課題となる。そこで、RC-IGBT チップを採用することにより、この問題を解決した。

図 3 に RC-IGBT チップの概略図と等価回路図を示す。前述のとおり、RC-IGBT チップは IGBT と FWD を同一チップ上に形成したチップであり、第 6 世代 IGBT チップと第 6 世代 FWD チップを合わせた面積（総面積）に対し、第 7 世代 RC-IGBT チップの方が小さくなる。

表 2 に 650 V/20 A の第 6 世代チップと第 7 世代チップの比較を示す。第 6 世代 IGBT-IPM のチップ総面積に対し、第 7 世代 IGBT-IPM のチップ総面積は 33% 低減する。第 7 世代 RC-IGBT チップは第 6 世代 IGBT チップ、FWD チップ単体の面積より大きいいため、アルミニウ

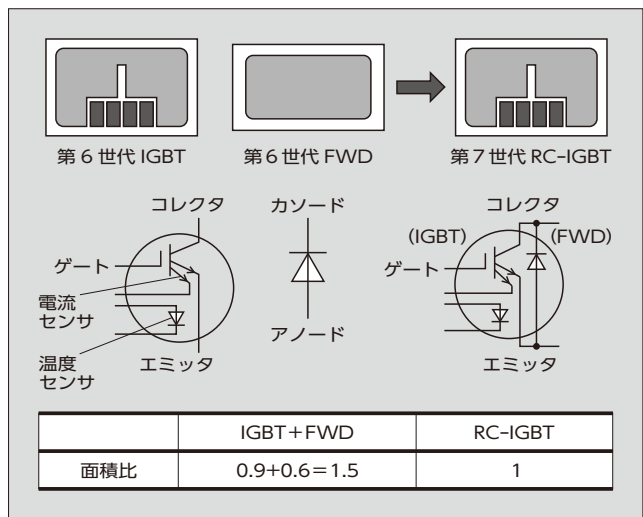


図3 RC-IGBT チップの概略図と等価回路図

表 2 650 V/20 A の第 6 世代チップと第 7 世代チップの比較

項目	第 6 世代 IGBT+FWD	第 7 世代 RC-IGBT
チップ総面積比	IGBT+FWD 0.9+0.6=1.5	1.0 (-33%)*
アルミニウム ワイヤ本数	4本	4本
FWD熱抵抗値 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	1.96	1.21 (-38%)*

*第6世代からの低減率

ムワイヤは従来と同じ本数をボンディングすることができる。さらに、熱抵抗値は、チップサイズが大きくなるため 38% 低減し、放熱性の向上が期待できる。これにより、製品特性や信頼性の悪化を伴わずにパッケージの小型化を実現した。

(2) ΔT_{vj} パワーサイクル寿命の向上

本稿で述べているパワーモジュールの代表的な寿命特性として ΔT_{vj} パワーサイクル寿命がある。これは、チップの温度変化 ΔT_{vj} の繰り返しの許容できる回数で定義される。許容回数を越えて ΔT_{vj} が繰り返しが起こると製品が故障する。これは、 ΔT_{vj} により熱応力が発生し、チップ-アルミニウムワイヤ接合部、チップ-はんだ接合部の摩擦劣化が生じるためである。また、 ΔT_{vj} パワーサイクル寿命は ΔT_{vj} に依存し、 ΔT_{vj} が大きくなるほど短くなる。

NC 工作機などには低速動作や高トルク動作を行うために、低周波で動作させるモードがある。低周波動作においては同じ相の IGBT チップや FWD チップに電流が流れている時間が長いので、チップ温度が上昇しやすい。また、電流が流れない時間も長く、その間にチップ温度が低下する。そのため、低周波動作ではチップの ΔT_{vj} が大きく、発生する熱応力も大きくなり、 ΔT_{vj} パワーサイクル寿命が短くなる。

図 4 に低周波動作時のチップ温度推移の試算結果を示す。従来の IGBT チップと FWD チップを搭載した第 6 世代 IGBT-IPM では、インバータ動作時は、IGBT チップ

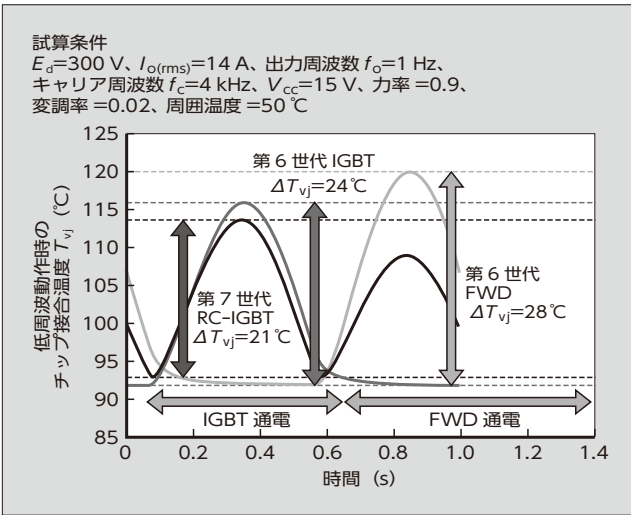


図4 低周波動作時のチップ温度推移の試算結果

と FWD チップが交互に発熱するため、発熱期間の有無で ΔT_{vj} は大きくなる。その結果、 ΔT_{vj} は IGBT で 24°C、FWD で 28°C となる。一方、RC-IGBT チップを搭載した第7世代 IGBT-IPM は、RC-IGBT は IGBT 領域と FWD 領域が1チップ内で交互に発熱するため、チップ温度変化量が低減する。さらに、熱抵抗値の改善により、チップ温度の上昇が抑えられる。これにより、第7世代 IGBT-IPM の RC-IGBT チップの ΔT_{vj} は、第6世代 IGBT-IPM の IGBT チップと FWD チップの組合せにおいて、温度変化量が多い FWD チップに対して 7°C 低くなる。図5に ΔT_{vj} パワーサイクル寿命曲線を示す。本事例では、 ΔT_{vj} パワーサイクル寿命が約10倍になると推定される。

(3) 損失の低減

(a) IGBT の飽和電圧とターンオフ損失

第7世代 IGBT チップは、表面のトレンチゲート構造の微細化と薄ウェーハ加工技術によるドリフト層の薄化によって、コレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(\text{sat})}$ とターンオフ損失 E_{off} のトレードオフを改善した。P639 に搭載する RC-IGBT チップにおいても第7世代チ

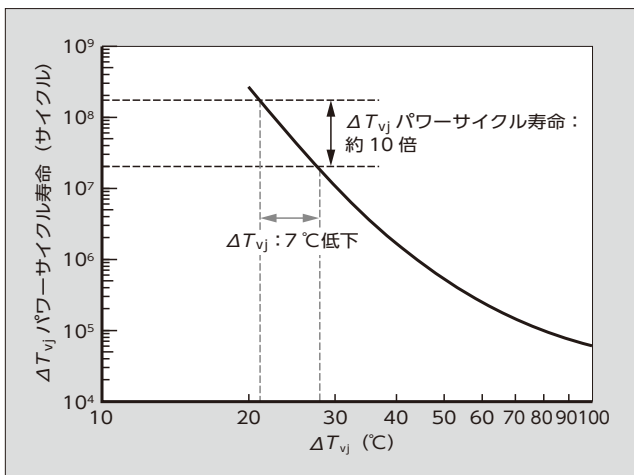


図5 ΔT_{vj} パワーサイクル寿命曲線

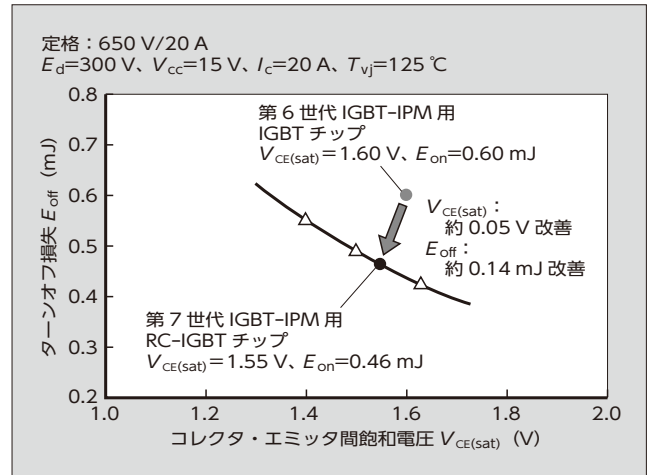


図6 コレクタ・エミッタ間飽和電圧とターンオフ損失のトレードオフ

ップ技術を採用し、図6に示すように、従来製品の第6世代 IGBT チップと比べ、 $V_{CE(\text{sat})}$ を 0.05 V 低減し、かつ E_{off} を 0.14 mJ 低減した。

(b) ターンオン損失

図7に第7世代 IGBT-IPM 650 V/20 A のターンオン損失 E_{on} の電流と温度の依存特性を示す。 E_{on} は、IGBT を駆動する制御 IC に新たな制御技術を採用することで低減を図った。一般的に IGBT チップの特性には温度依存性があり、チップの温度が高いほど電圧変化率 dv/dt が小さくなり、 E_{on} が増加する傾向がある。この影響により、従来の制御技術を適用した 650 V/20 A の場合、定格電流時の E_{on} が常温時 (25°C) に対し、高温時 (125°C) は 12.4% 増加する。一方、第7世代 IGBT-IPM では、新たな制御技術により、IGBT チップの温度が高くなるとターンオン時のゲート駆動電流を調整し、 dv/dt を最適に制御する。これは IGBT チップ上に形成されている温度センサを活用し、リアルタイムに IGBT チップの温度をゲート駆動回路にフィードバックすることで高温時の dv/dt が小さくなることを抑制している。本機能により、 $T_{vj}=25$ °C に対し、 $T_{vj}=125$ °C における E_{on} の増加を 6.8% に抑えることが可能である。

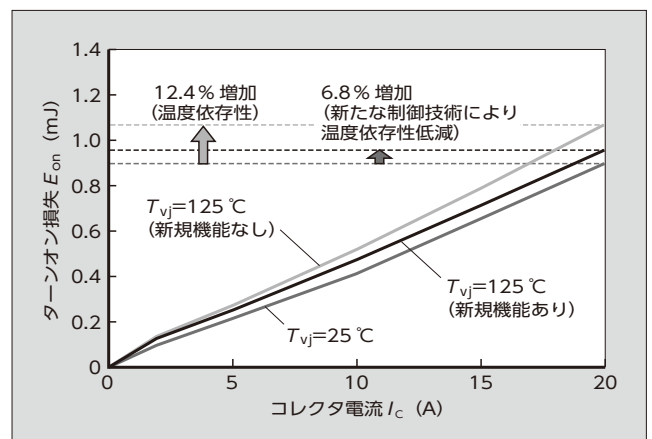


図7 ターンオン損失の電流と温度依存特性

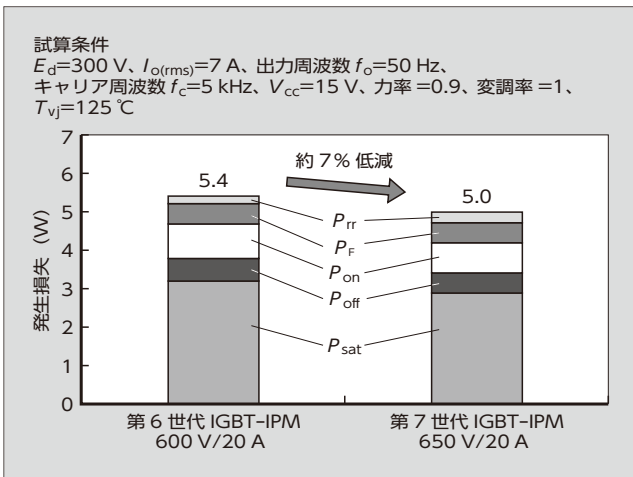


図 8 発生損失のシミュレーション結果

(c) インバータ動作時の損失

図 8 に 650 V/20 A の第 6 世代 IGBT-IPM と第 7 世代 IGBT-IPM における三相 PWM (Pulse Width Modulation) インバータ動作時のアーム当たりの発生損失をシミュレーションした結果を示す。第 7 世代 IGBT-IPM は、 $V_{CE(sat)}$ と E_{off} のトレードオフ改善と E_{on} の低減により、発生損失を第 6 世代 IGBT-IPM に対し、約 7% 低減している。

(d) 放熱性能

図 9 に示すように、P639 は P629 に対し、パッケージを小型化するため、チップにて発生した熱を放熱する役割を持つ銅ベースの面積を 32% 縮小しており、放熱性が悪化する。図 10 にヒートシンクの放熱性能と発生損失を同一の条件として、FEM (有限要素法: Finite Element Method) により銅ベースの温度分布の解析をした結果を示す。P629 に比べ、P639 は銅ベースの面積を縮小したことにより、ケースの温度変化量 ΔT_c が約 6% 増加してしまう。

しかし、前述のとおり、第 7 世代 IGBT-IPM は第 6 世代 IGBT-IPM に対して、発生損失を約 7% 低減しているため、銅ベースサイズの縮小により ΔT_c が増加しても、発生損失を低減したことにより、同等のチップ温

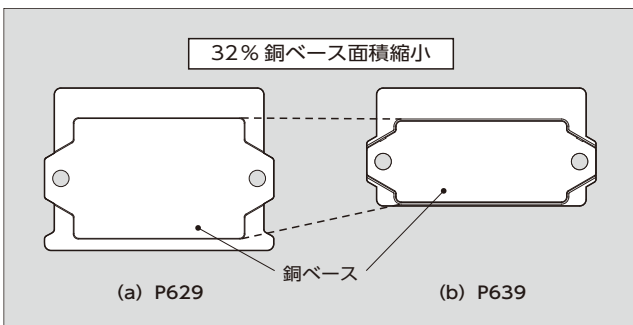


図 9 銅ベースサイズの比較

〔注〕アーム：219 ページ「解説 1」を参照のこと

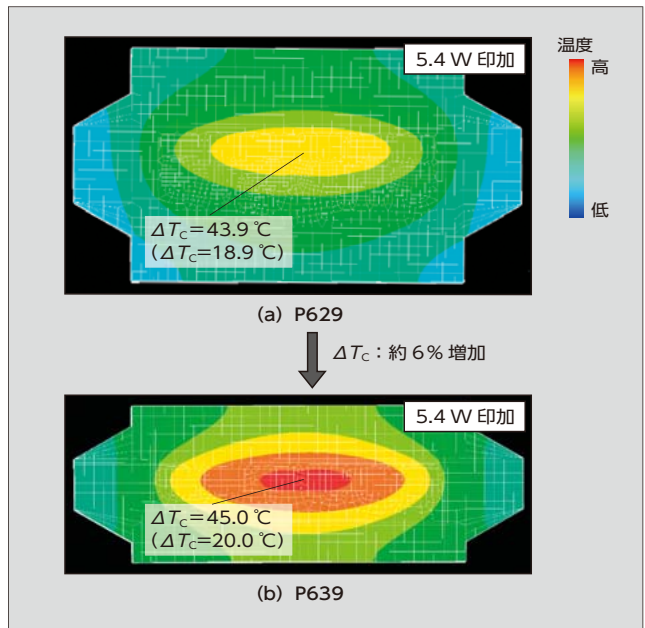


図 10 FEM による銅ベースの温度分布の解析結果

表 3 許容動作温度の比較

項目	第6世代IGBT-IPM	第7世代IGBT-IPM
最高ケース温度 T_{cmax}	110 $^\circ\text{C}$	125 $^\circ\text{C}$
連続動作時最高接合温度 T_{vjop}	125 $^\circ\text{C}$	150 $^\circ\text{C}$
最高接合温度 T_{vjmax}	150 $^\circ\text{C}$	175 $^\circ\text{C}$

度に抑制することが可能である。このことから、容易に置換えが可能となる。

(4) 高温動作化

表 3 に第 7 世代 IGBT-IPM と第 6 世代 IGBT-IPM の許容動作温度の比較を示す。第 7 世代 IGBT-IPM は、第 7 世代のパッケージ技術である高耐熱ゲルや高信頼性はんだなどの高温動作を可能にする技術を採用し、連続動作時の最高接合温度 T_{vjop} を第 6 世代 IGBT-IPM の 125 $^\circ\text{C}$ から 150 $^\circ\text{C}$ に拡大した。また、最高接合温度 T_{vjmax} は 150 $^\circ\text{C}$ から 175 $^\circ\text{C}$ に拡大した。これにより、装置冷却部品の小型化が可能となった。

③ 適用機器の小型化への貢献

例として、第 6 世代 IGBT-IPM の P629 を使った 60 mm 幅のサーボアンプを本稿で述べた第 7 世代 IGBT-IPM の P639 を用いて小型化した場合について述べる。図 11 に示すように、サーボアンプには、冷却部品が筐体の後方についたバックフィンタイプのものである。このタイプのサーボアンプでは IGBT-IPM の短手の幅が低減した分、サーボアンプ筐体 (きょうたい) 幅の低減が可能である。すなわち、P629 から P639 に置き換えることで、アンプ幅としては 13.5 mm (約 20%) 縮小するこ

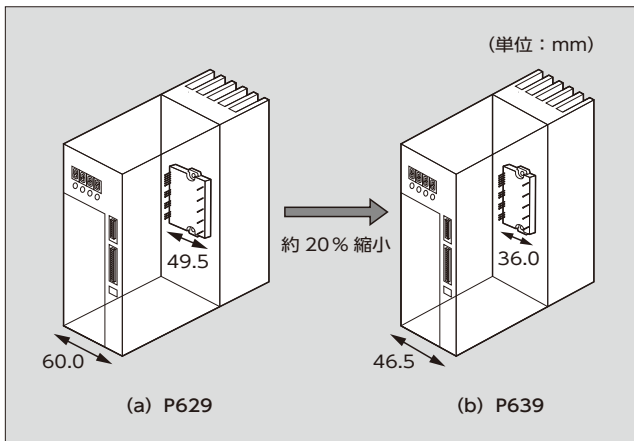


図 11 バックフィンタイプのサーボアンプ模式図

とができる。これにより、サーボアンプを収納する制御盤の小型化が図られ、サーボシステム全体を省スペース化することが期待できる。

4 あとがき

本稿では、RC-IGBT チップを搭載した第7世代 IGBT-IPM の新小型系列である P639 について述べた。

小型系列製品のラインアップを拡充したことにより、今後の電力変換装置のさらなる小型化に貢献できると考えている。

今後も継続的な技術革新を推進し、市場要求に応える製品の開発を行っていく。さらには、IGBT モジュールの製品開発をとおして地球温暖化対策や、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 皆川啓ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.219-223.

- (2) 寺島健史ほか. 小型パッケージ「P644」を採用した第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.4, p.234-238.
- (3) 皆川啓ほか. 第7世代「Xシリーズ」大容量IGBT-IPM「P631」. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.251-255.
- (4) Satou, K. et al. “The 7th Generation Intelligent Power Module for Industrial Applications”. Proceeding of PCIM Asia 2021.
- (5) 江袋佑太ほか. 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュール「Dual XT」. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.246-250.
- (6) Kawabata, J. et al. “The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”. Proceeding of PCIM Europe 2015.



黒澤 英二

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業設計第一部。



城塚 直彦

パワーモジュールのパッケージ設計に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業設計第一部。



唐本 祐樹

パワー半導体の設計開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業設計第一部。





*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。