

小型パッケージ「P644」を採用した第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM

7th-Generation “X Series” IGBT-IPM with “P644” Compact Package

寺島 健史 TERASHIMA, Kenshi

及木 達矢 OYOBIKI, Tatsuya

大瀬 智文 OSE, Tomofumi

富士電機は、電力変換装置のさらなる小型化や高効率化、高出力化の要求に応えるため、ブレーキ回路内蔵 IPM としては業界最小クラスの「P644」パッケージを採用した IGBT-IPM を開発した。この製品は、第7世代チップ技術とパッケージ技術を適用した「Xシリーズ」IPM の系列に属する。従来製品の「Vシリーズ」IPM「P636」に比べ、連続動作時の発生損失を約17%低減し、150℃での高温動作化を実現した。これにより、モジュール設置面積を約12%縮小し、インバータの出力電流を約26%増加できる。

Fuji Electric has developed a new IGBT-IPM to meet the requirements of the further miniaturization, high efficiency, and high power of conversion systems by using the “P644” package, which is the smallest in the industry for IPMs equipped with a brake circuit. This IPM is included in our line-up of the “X Series” IPMs, which uses a 7th-generation chip and packaging technologies. The new X Series IPM has lower power dissipation than the conventional “V Series” IPMs using “P636” by approximately 17% and can operate in high-temperatures up to 150°C. These enhancements can reduce the module footprint by approximately 12% and increase inverter output current by approximately 26%.

1 まえがき

地球温暖化とエネルギー問題は、近年の重要な課題である。この課題を解決する上で、エネルギーを効率的に利用し、省エネルギー化に貢献するパワーエレクトロニクス電力変換装置においてキーデバイスであるパワー半導体の技術開発は不可欠である。

富士電機は、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの製品化を通じて電力変換装置の小型化や高効率化、高出力化に貢献してきた。IGBT-IPM (Intelligent Power Module) は、IGBT と FWD (Free Wheeling Diode) からなる通常の IGBT モジュールに、IGBT のゲート駆動回路や保護回路などを内蔵した高機能 IGBT モジュールである。このゲート駆動回路は、顧客要求である低損失化を実現するよう最適設計されており、スイッチング損失と放射ノイズのトレードオフ特性の改善が可能となる。IPM に搭載される IGBT と FWD の改良に加え、ゲート駆動回路による低損失化によって動作時の温度上昇を抑制し、IGBT-IPM を小型化してきた。

電力変換装置のさらなる小型化、高効率化、高出力化の要求に応えるために、ブレーキ回路を内蔵した IGBT-IPM としては最小クラスの「P644」パッケージを採用した第7世代 IGBT-IPM (Xシリーズ IPM) を開発した。

本稿では、製品の特徴と電力変換装置への効果について述べる。

2 製品概要

図1に新小型パッケージである Xシリーズ IPM「P644」(X-P644) の外観、図2に回路ブロック図を示す。P644 パッケージの外形寸法は、W87.0×D50.2×H12.0 (mm)

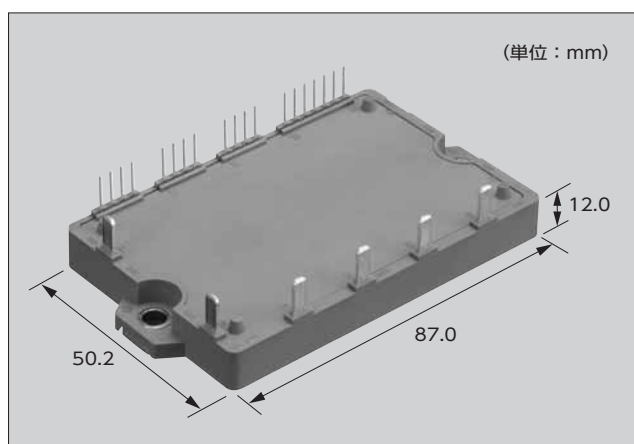


図1 Xシリーズ IPM「P644」の製品外観

である。三相インバータ回路とブレーキ回路を一つのモジュールに集積化した 7 in 1 の回路構成となっている。ブレーキ回路の搭載により、外付けのブレーキ回路が不要となり、電力変換装置の小型化、省スペース化に貢献する。

表1に製品ラインアップを示す。X-P644 の製品ラインアップは、定格 650 V 系は 50 A と 75 A、定格 1,200 V 系は 25 A と 35 A である。同一定格帯の従来の V シリーズ IPM「P636」に比べ小型化し、冷却器上のモジュール設置面積を 12% 縮小した。

第7世代チップ技術による IGBT チップの低損失化と、ゲート駆動回路の改善によって、従来の V シリーズ IPM に比べ低損失化と小型化を同時に実現した。さらに、連続動作時の接合温度 T_{vjop} の最高温度を V シリーズ IPM の 125℃から 150℃に拡大し、高温動作を可能にした。

X シリーズ IPM のアラーム出力において下アーム保護^(注1)

〈注1〉 上アームと下アーム：255 ページ「解説1」を参照のこと

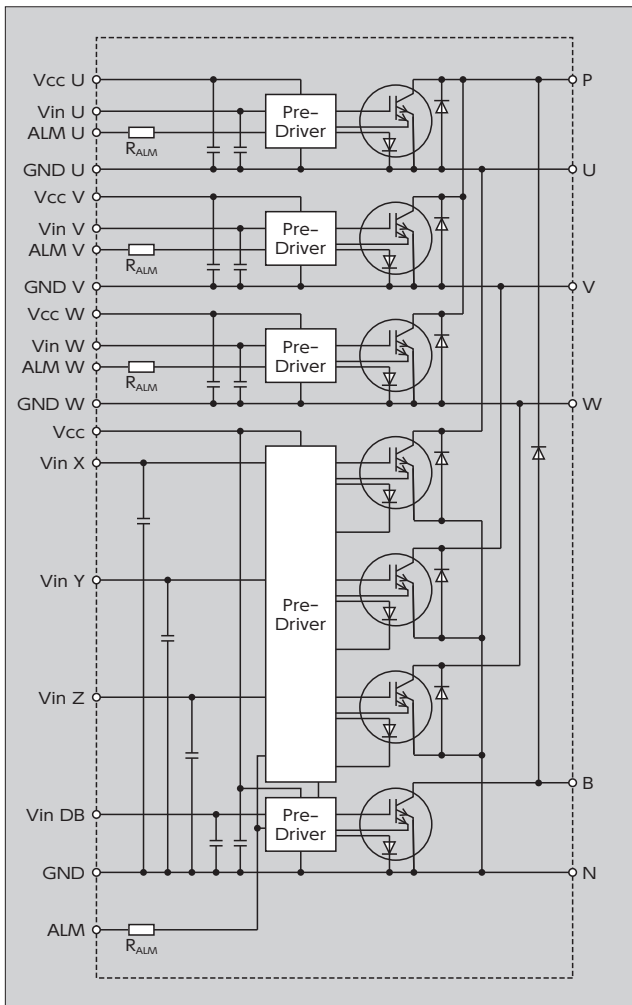


図2 回路ブロック図

表1 製品ラインアップ

定格電圧	定格電流		製品型式	内蔵機能
	INV	DB		
650 V	50 A	30 A	7MBP50XJA065-50	- IGBT駆動回路 - 過電流保護 - 制御電源電圧低下保護 - チップ加熱保護 - アラーム出力（上下アラーム）
	75 A	50 A	7MBP75XJA065-50	
1,200 V	25 A	15 A	7MBP25XJA120-50	
	35 A	25 A	7MBP35XJA120-50	

動作時のブレーキ部 IGBT の独立動作を可能にした。従来の V シリーズ IPM では、下アームが異常を検知してアラームを出力すると、ブレーキ部の動作を含む下アーム全ての動作を停止する回路ロジックとなっていた。そのため、下アームが異常を検知するとモータの回転エネルギーをブレーキ回路で回生できず、P-N 間電圧が上昇して、場合によっては半導体素子が過電圧破壊してしまうという問題があった。この問題を解決するため、X シリーズ IPM では、下アームが異常を検知しアラームを出力しても、ブレーキ部が独立して動作するようにした。これにより、モータからの電力回生による主電源の P-N 間電圧の上昇を抑制した。なお、ブレーキ部の異常の場合には従来

どおりブレーキ部と同時に他の下アームのインバータ部も保護する仕様となっている。

③ 小型化と発生損失の低減

3.1 ターンオフ特性の改善

P644 パッケージの採用による小型化と IGBT-IPM の高出力化を両立する上で、電力密度の上昇に伴うパッケージ内部の熱集中と熱干渉によるチップ温度上昇が問題であった。この問題の解決においては、IGBT-IPM の発生損失の低減が重要である。

第7世代の IGBT 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・エミッタ飽和電圧とターンオフ損失のトレードオフ特性を改善した⁽²⁾⁽³⁾。

図3に、X-P644 と従来製品 V シリーズ IPM 「P636」の飽和電圧とターンオフ損失のトレードオフ特性を示す。X-P644 は、V-P636 と比べ、飽和電圧を約 0.1 V 低減、ターンオフ損失を約 29% 低減した。これにより、X-P644 は、V-P636 に比べ、図7に示す IGBT-IPM の発生損失の約 60% を占める定常損失 P_{sat} とターンオフ損失の合計を連続動作時で約 19% 低減した。

また、裏面構造のフィールドストップ (FS) 層を最適化することで、薄ウェーハ化による素子耐圧の低下およびターンオフ時の電圧振動を抑制した。

3.2 ターンオン特性の改善

IGBT-IPM の発生損失を低減するために、前述の IGBT のトレードオフ特性の改善に加え、発生損失の約 20% を占める IGBT のターンオン損失を改善した。図4に示すように、X-P644 は V-P636 と比較して、ターンオン損失を約 13% 低減した。

X シリーズ IPM では、スイッチング時のターンオン損失を低減するために、IGBT チップの接合温度に応じて IGBT のターンオン時のゲート駆動能力を最適に制御する機能を新たに搭載した。一般に IGBT は、温度が高いほ

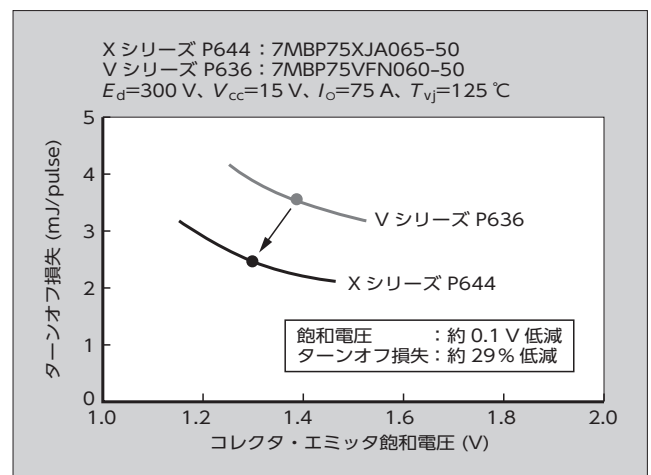


図3 第7世代 IGBT のトレードオフ特性

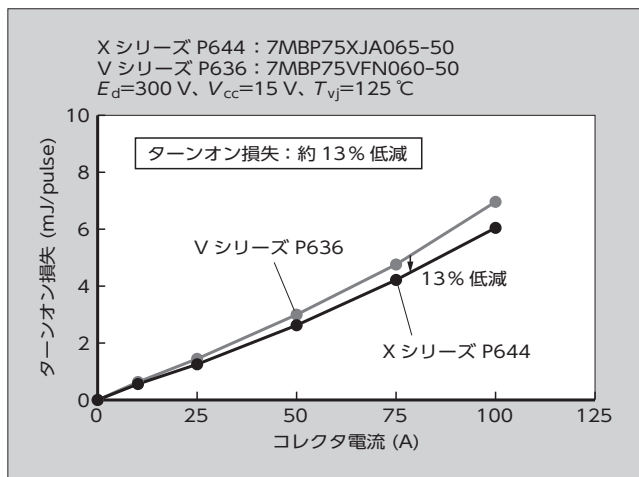


図4 ターンオン損失の比較

ど電圧変化 dv/dt や電流変化 di/dt が小さくなりスイッチングが遅くなるため、発生損失が増加する。Xシリーズ IPM では、IGBT に内蔵した温度センサを使って IGBT の温度をリアルタイムに監視することにより、温度上昇によってスイッチング時の電圧変化 dv/dt や電流変化 di/dt が小さくならないようターンオン駆動能力の切替え制御を行っている⁽¹⁾。図5に示すように、本機能によって定格電流でのターンオン損失を約25%低減することが可能である。

また、スイッチング損失を低減するためスイッチング特性 dv/dt や di/dt を大きくすると、放射ノイズが大きくなる。すなわち、スイッチング損失と放射ノイズはトレードオフの関係にある。Xシリーズ IPM は、 dv/dt や di/dt が従来のVシリーズ IPM と同等になるようにターンオン駆動能力切替え機能を最適化し、放射ノイズを抑制しつつ、スイッチング損失を低減した。図6に示すように、同じ定格製品（650V/75A）において、X-P644の放射ノイズはV-P636と同等レベルとなっている。

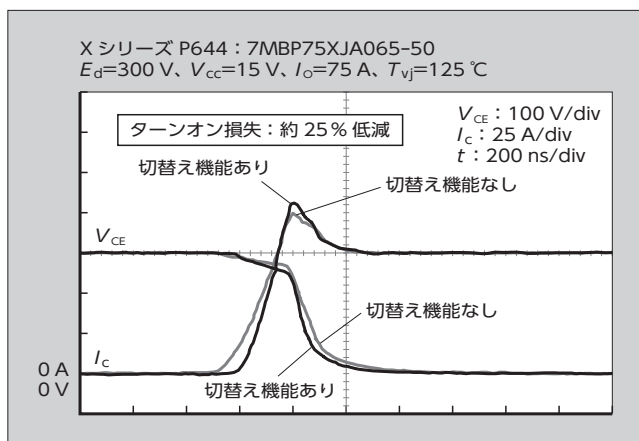


図5 ターンオン駆動能力切替え機能によるターンオン損失の改善効果

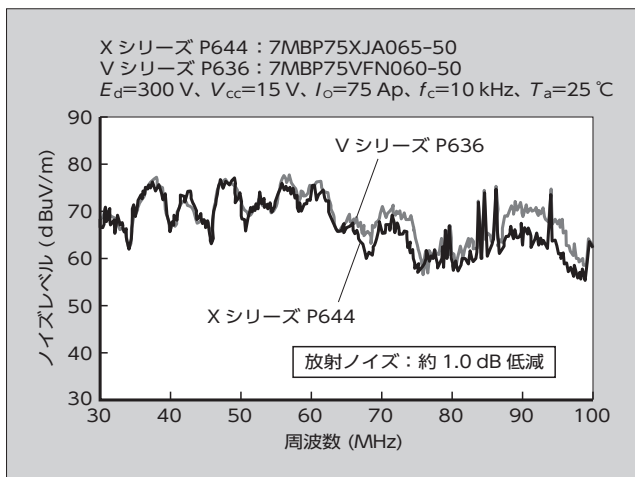


図6 放射ノイズの比較（相対比較試験結果）

3.3 発生損失

図7に、同じ定格製品（650V/75A）におけるPWMインバータ動作時の発生損失のシミュレーション結果を示

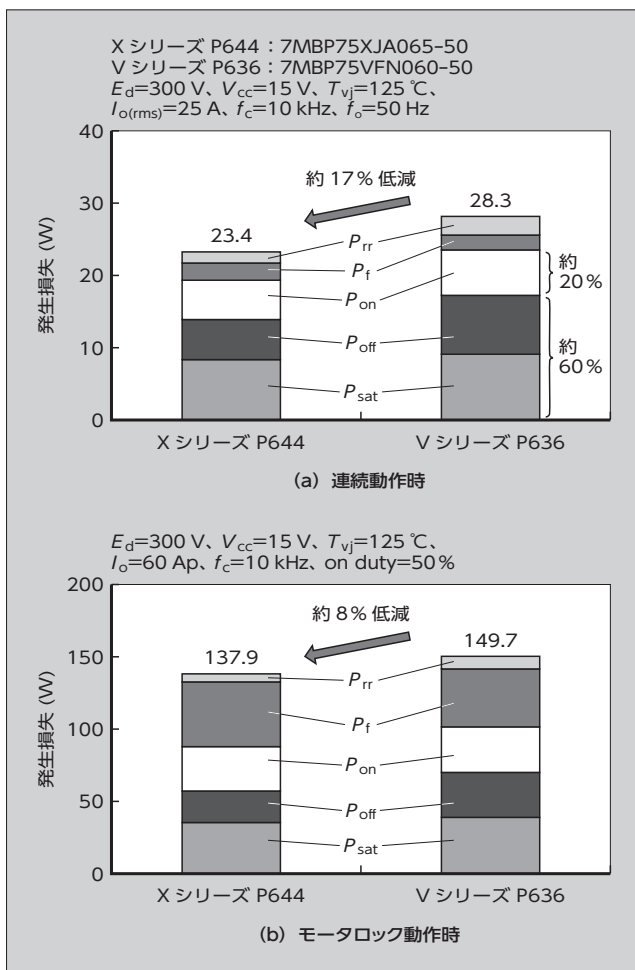


図7 発生損失シミュレーションの比較

〈注2〉モータロック：モータが制御可能状態で位置を保持している状態である。外から力がかかったときに停止している位置がずれても、停止位置に戻そうと制御する。

す。前述の特性改善により、X-P644 のトータル発生損失は、V-P636 と比較して、連続動作時に約 17%、モータロック動作時に 8% 低減した ($f_c=10$ kHz)。

④ 高温動作化

表 2 に、X-P644 と V-P636 の最高動作温度の比較を示す。X-P644 は、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高温動作を可能にする技術の採用により、連続動作時の接合温度 T_{vjop} を V シリーズ IPM の 125 °C から 150 °C に拡大し、最高接合温度 $T_{vjmax}^{(1)(2)(3)}$ を V シリーズ IPM の 150 °C から 175 °C に拡大した。

⑤ 低価格基板の採用

従来製品の V-P636 は、高熱伝導絶縁基盤である AlN (窒化アルミニウム) 材を採用し低熱抵抗化することで、熱集中による温度上昇を改善していた。一方、X-P644 は、チップの高温動作を可能にしたため動作温度範囲が拡大している。さらに発生損失の低減により、AlN 材よりも安価で一般的に広く使われている Al_2O_3 (アルミナ) 材を絶縁基板として採用し、低価格化を実現した。

X-P644 の絶縁基板の変更と小型化したパッケージ

表 2 最高動作温度の比較

項 目	Xシリーズ IPM	Vシリーズ IPM
最高ケース温度 T_{cmax}	125 °C	110 °C
連続動作時チップ接合温度 T_{vjop}	150 °C	125 °C
最高チップ接合温度 T_{vjmax}	175 °C	150 °C

内部の熱集中と熱干渉による温度上昇を確認するために、FEM (有限要素法: Finite Element Method) による過渡伝熱解析を行った。図 8 は、V-P636 と同じ連続動作条件で X-P644 を動作させたときの温度分布の比較である。V-P636 は連続動作時の接合温度の上限値 $T_{vjop}=125$ °C に対して、マージンがわずか 5 °C であるが、X-P644 は接合温度の上限値 $T_{vjop}=150$ °C に対して、26 °C のマージンが確保できている。このため、 Al_2O_3 材絶縁基板でも問題なく適用可能である。

⑥ 小型化と高出力化

図 9 に示すように、X-P644 は V-P636 に対し、出力電流を約 26% 増加することができる。

また、図 10 は図 8 の連続動作時の状態からモータロック動作したときの温度分布の比較である。V-P636 と同じ条件でロック動作させたとき、X-P644 は小型化に

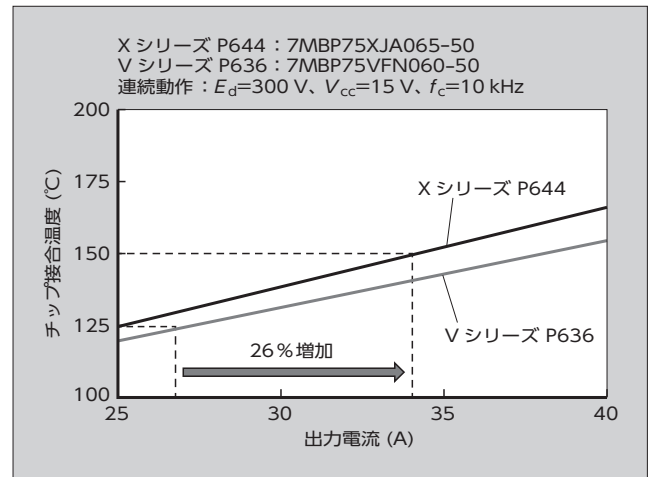


図 9 電力変換装置の出力電流と接合温度

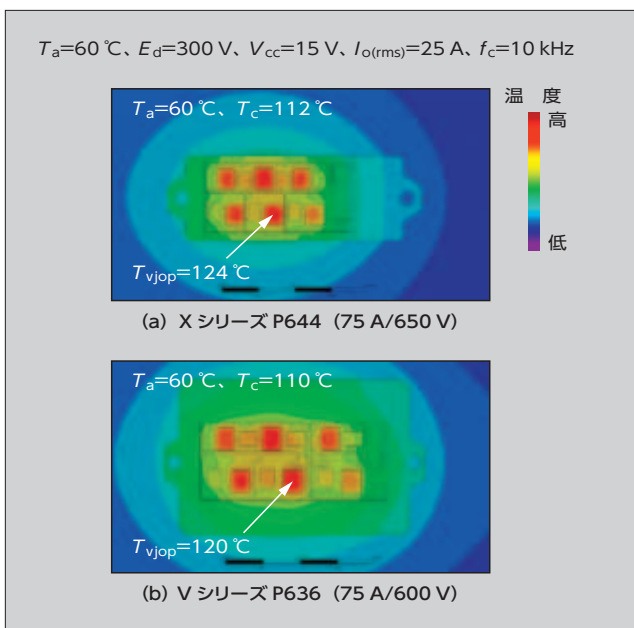


図 8 連続動作時の温度分布比較 (過渡伝熱解析結果)

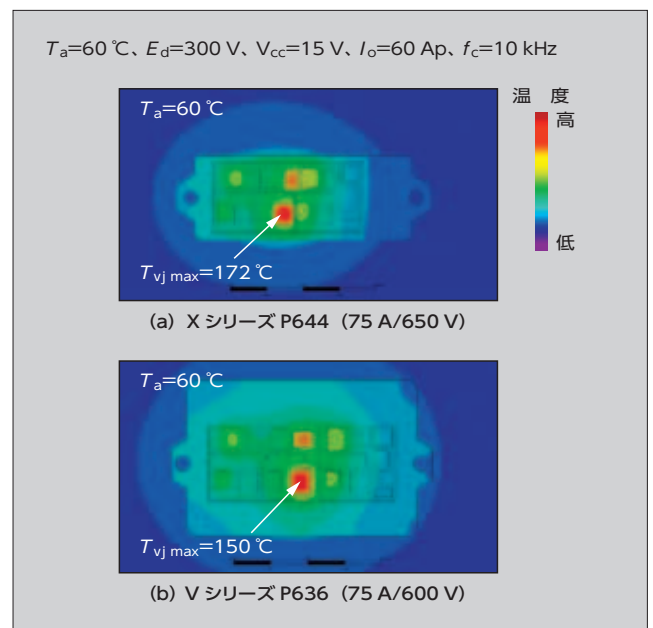


図 10 モータロック動作時の温度分布比較 (過渡伝熱解析結果)

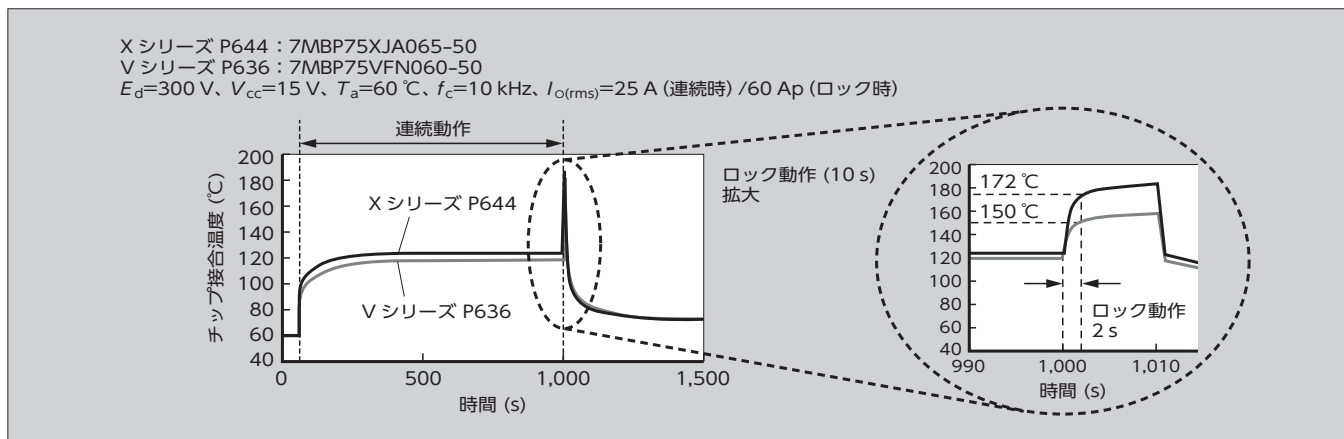


図 11 接合温度上昇の比較 (過渡伝熱解析結果)

より接合温度が $T_{vj}=172\text{ }^{\circ}\text{C}$ と高くなるが、最高接合温度 $T_{vj\text{ max}}=175\text{ }^{\circ}\text{C}$ よりも低いため、従来製品と同じ条件で使用可能である。図 11 に、上述の一連の動作における接合温度の変化の比較を示す。これらの結果より、V-P636 から X-P644 に置き換えることにより、電力変換装置のモジュールの設置面積を約 12% 縮小できるだけでなく、さらなる高出力化が可能である。

7 あとがき

小型パッケージ「P644」を採用した第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM について述べた。

ブレーキ回路を内蔵した 7 in 1 の IGBT-IPM としては業界最小クラスの「P644」を新たに製品系列にラインアップをしたことにより、今後の電力変換装置のさらなる小型化とコストダウンを実現し、広く世の中に貢献できると考えている。

今後もさらなる技術革新を推進し、IGBT モジュールの製品開発をとおりて世界的なエネルギー、環境問題の解決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) 川畑潤也ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.254-258.
- (3) Kawabata, J. et al. “The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”. Proceeding of PCIM Europe 2015.



寺島 健史

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。
 現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部産業事業部産業モジュール部。



及木 達矢

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。
 現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部産業事業部産業モジュール部。



大瀬 智文

パワーモジュールのパッケージ設計に従事。現在、富士電機深圳有限公司開発室パワー半導体開発部。



*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。