

第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM

7th-Generation “X Series” IGBT-IPMs

皆川 啓 MINAGAWA, Kei

森 貴浩 MORI, Takahiro

大瀬 智文 OSE, Tomofumi

インバータをさらに小型化・低損失化・高性能化するため、第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPMを開発した。本製品は、最新の第7世代「Xシリーズ」チップと新制御ICの適用により、従来品に比べて約7%以上の発生損失低減と150°Cでの連続運転を実現した。これにより、装置の出力電流を約31%増加できる。また、従来の保護機能に加えて温度ワーニング機能を内蔵することにより、装置の動作停止を回避できるようになった。さらに、下アームの保護動作時においてブレーキ部が独立して動作するので、半導体素子の過電圧破壊を防ぐことができる。

Fuji Electric has developed the 7th-generation “X-Series” IGBT-IPMs that allow inverters to achieve further miniaturization, loss reduction and performance improvement. By using the latest 7th-generation “X Series” chips and new control ICs, the product enables continuous operation at 150°C, while achieving a loss reduction of about 10% compared with previous products. This makes it possible to increase the output current of equipment by approximately 31%. Furthermore, in addition to conventional protection functions, built-in temperature warning function makes it possible to avoid device stoppages. Moreover, the brake unit can be independently operated when lower-arm protection is activated, preventing overvoltage breakdown of semiconductor devices.

1 まえがき

近年、地球温暖化の対策や安全・安心で持続可能な社会を実現するために、エネルギーを効率的に利用し、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への期待が高まっている。このような中、産業、民生、自動車、再生可能エネルギーなどの幅広い分野で用いられる電力変換装置のキーデバイスであるパワー半導体の需要が拡大している。

富士電機では、1988年にパワー半導体のIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールを製品化して以来、多くの技術革新によって小型化、低損失化、高信頼性化を実現してきた。IPM (Intelligent Power Module) は、駆動機能や保護機能を備えたIGBTモジュールである。このIPMにおいて、業界で初めてとなるIGBTチップの過熱保護機能やアラーム要因識別機能を内蔵し、高性能化や高信頼性化の要求に応え、電力変換装置の小型化、高効率化、高信頼性化に貢献してきた。

今回、インバータのさらなる小型化、低損失化、高性能化の要求に応えるために、第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM (XシリーズIPM) を新たに開発した。

2 製品概要

図1にXシリーズIPMの外観を、表1に製品ラインアップおよび製品外形図を示す。XシリーズIPMは、市場の小型化要求に応えるために新たに三つのパッケージ「P639」「P644」「P638」をラインアップに加え、定格電流に応じた八つのパッケージを展開する。新パッケージとなるP639は、RC-IGBT (Reverse Conducting-IGBT⁽¹⁾) を採用することにより、従来パッケージの中で最小サイ

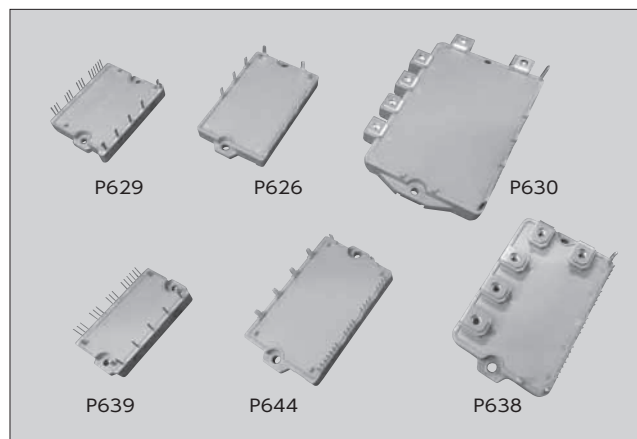


図1 第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM (代表パッケージ)

ズである「P629」よりも、さらに冷却器上の設置面積を27%小型化した。P644は、従来パッケージの「P626」と同一外形サイズで7 in 1を可能にしたパッケージである。P638は、従来の同一電流量帯のパッケージ「P630」よりも、冷却器上の設置面積を54%小型化したパッケージである。なお、高い放熱性が求められる高い定格電流の製品では、高放熱絶縁基板を採用している。また、XシリーズIPMは、市場の大電流化の要求にも応えた電流定格の製品をラインアップに加えている。従来の「Vシリーズ」IGBT-IPM (VシリーズIPM⁽²⁾) では、定格600V品では400Aまで、定格1,200V品では200Aまでのラインアップであった。XシリーズIPMは、定格650V品では450Aまで、定格1,200V品では300Aまでラインアップを拡充している。新パッケージの系列化と既存パッケージにおける定格電流の拡大によって、搭載される装置の小型化に貢献する。

また、XシリーズIPMは、第7世代IGBT技術とそれ

表1 「Xシリーズ」IPMの製品ラインナップおよび製品外形図

(a) 製品ラインナップ

定格	素子数	20A	30A	50A	75A	100A	150A	200A	250A	300A	450A
600V	6 in 1	P639									
				P629							
				P626*2		P638*1*2					
	7 in 1			P638*2		P638*1*2					
				P644							
		6 in 1 7 in 1		P636*1*2		P630*2		P630*1*2			
定格	素子数	10A	15A	25A	35A	50A	75A	100A	150A	200A	300A
1,200V	6 in 1	P639									
				P629							
				P626*2		P638*1*2					
	7 in 1			P638*2		P638*1*2					
				P644							
		6 in 1 7 in 1		P636*1*2		P630*2		P630*1*2			
						P630*1*2			P631*1*2		

*1: 高放熱絶縁基板適用製品 *2: 温度ワーニング機能内蔵製品 (6 in 1のみ)

(b) 製品外形図

パッケージ	P639	P629	P626	P644	P636	P638	P630	P631
外形								
D×W×H (mm)	36.0×70.0×12.0	49.5×70.0×12.0	50.2×87.0×12.0	50.2×87.0×12.0	55.0×90.0×18.5or17.0	55.0×90.0×22.0	84.0×128.5×14.0	110.0×142.0×27.0

を駆動する制御回路技術によって、VシリーズIPMよりも発生損失を約7%以上、低減している。また、第7世代パッケージ技術と制御回路の改善により、連続動作時のチップ接合温度 T_{vjop} 範囲をVシリーズIPMの125℃までから150℃までに拡大し、高温動作を可能にしている。これらの改善により出力電流を約31%増加することができる。

一方、保護機能に関しては、業界で初めてとなる温度ワーニング機能を持っている。この機能によって、IGBTチップが過熱状態であることを外部に警報として知らせることができる。これにより、電力変換装置の非常停止時間の短縮などの性能向上に貢献する。

3 主な機能と特徴

3.1 発生損失低減の取組み

電力変換装置の変換効率を改善するためには、IPMの発生損失の低減が重要である。この発生損失は、IGBTやFWD (Free Wheeling Diode) といった半導体チップの特性や、それを駆動する制御回路の性能によって決まる。

図2にIGBTチップの断面構造の比較を示す。第7世代IGBTは、第6世代IGBTと同様に表面は微細化したトレンチゲート構造を持ち、裏面にフィールドストップ (FS) 層を備えた薄ウェーハIGBTを採用している。第6世代IGBTと比較して、チップ厚を薄くすることでオン電圧 (コレクタ・エミッタ飽和電圧) とターンオフ損失を改善している。また、表面のトレンチゲート構造を最適化す

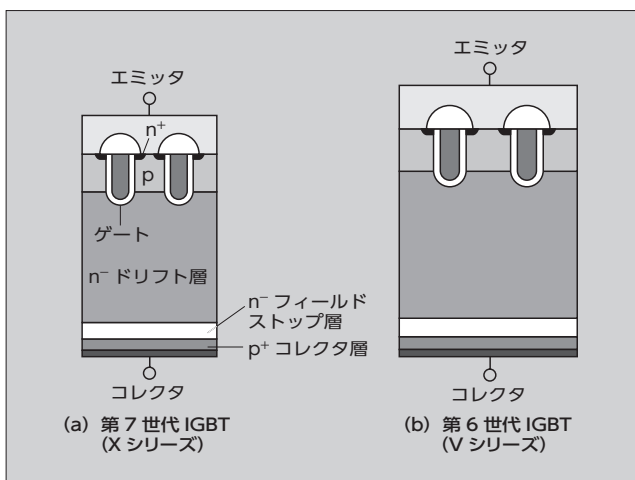


図2 IGBTチップの断面構造

ることで、表面側のキャリア濃度を高めるIE (Injection Enhanced) 効果を増強し、オン電圧とターンオフ損失のトレードオフ関係を改善している。IPM用IGBTは、標準的なIGBTモジュールに搭載しているIGBTよりも表面構造をさらに最適化している。この手法は、短絡保護機能を内蔵しているからできるIPM特有の改善方法である。このため、トレードオフがさらに改善している。図3にコレクタ・エミッタ飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ とターンオフ損失 E_{off} のトレードオフを示す。同一ターンオフ損失のときにIPM用第7世代IGBTは、IPM用第6世代IGBTよりもオン電圧が0.25V低減し、モジュール用第7世代IGBTよりも0.15V低減している。ただし、表面構造の微細化

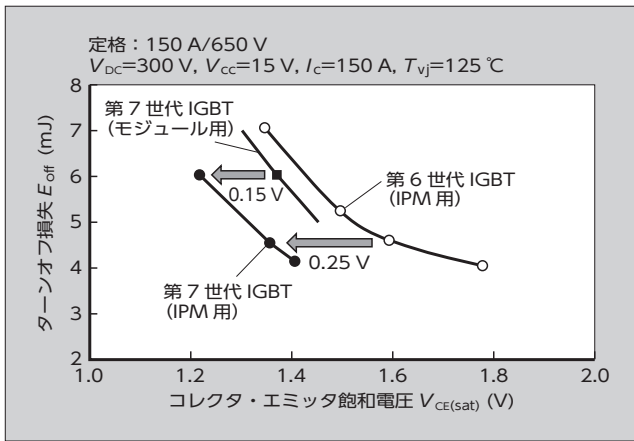


図3 コレクタ・エミッタ飽和電圧 - ターンオフ損失のトレードオフ

によりオン電圧を低減して電流を流しやすくしているため、短絡電流が増加する。そこで、短絡保護を高速化することでトレードオフを改善している。

また、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駆動回路にターンオン駆動能力切替え機能を搭載している。これは、高温時にIGBTを駆動する電流を増加させる機能であり、高温時のターンオン損失を低減している。また、IGBTチップの温

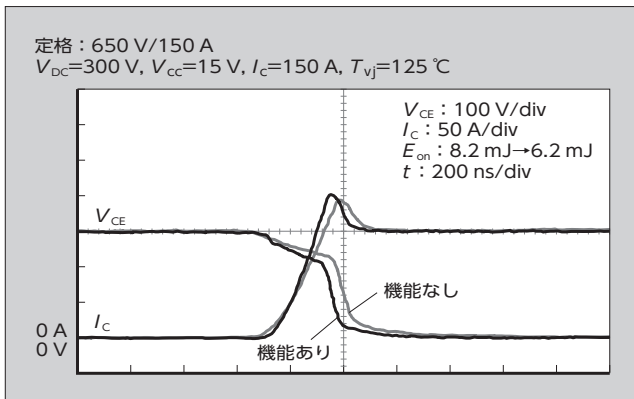


図4 駆動能力切替え機能によるターンオン損失の低減効果

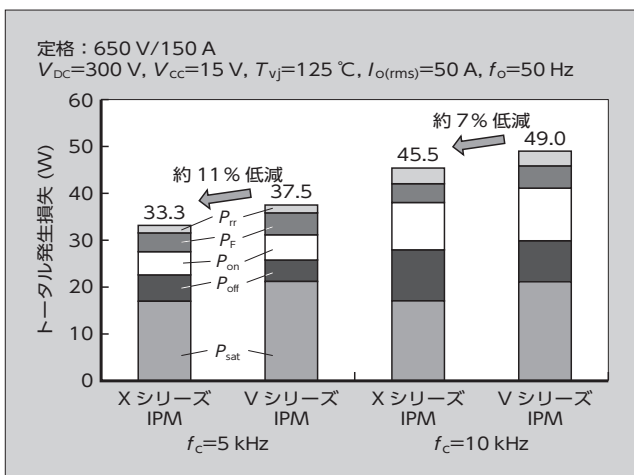


図5 発生損失シミュレーションの比較

度をリアルタイムで検出することにより、最適なタイミングで切り替わるようにしている。なお、スイッチング損失とトレードオフの関係にある放射ノイズへの影響がないように、駆動電流値を最適化している。図4に、IGBT駆動回路の駆動能力切替え機能によるターンオン損失の低減効果を示す。駆動能力を切り替えることによりターンオン損失を約24%低減している。

図5に、製品定格650V/150AにおけるPWMインバータ動作時の発生損失をシミュレーションした結果を示す。前述の特性改善により、XシリーズIPMのトータル発生損失は、VシリーズIPMよりも、キャリア周波数5kHz時に約11%、キャリア周波数10kHz時に約7%改善している。

3.2 保護機能特性

表2に、XシリーズIPMと従来のVシリーズIPMの保護機能の比較を示す。XシリーズIPMの特徴は、短絡保護機能の高速化とアラーム出力機能の改善、温度ワーニング出力機能の内蔵、アラーム時ブレーキ部独立動作である。

3.1節で述べたように、IGBTチップの表面構造の微細化は、IGBTのトレードオフを改善し、チップ性能を最大限に引き出すことができる。しかし、IGBTチップの短絡電流が増加するため、誤検出なしで短絡保護を高速化する必要がある。そこで、短絡電流のピーク電流の抑制の高速化に加え、遮断遅れ時間を最適化することで誤検出による誤動作を防止している。

また、業界で初めて搭載したアラーム要因識別機能については、XシリーズIPMにおいて、アラーム要因ごとの識別幅を0.1msから1.1ms以上に広げることでこのアラーム要因識別機能の識別性を高めている。これにより、アラーム出力時の要因分析、原因調査の容易化、迅速化を行うことができる。

さらに、XシリーズIPMでは、アラーム出力の新たな機能として、下アーム保護動作時のブレーキ部IGBTの独

表2 保護機能の比較

保護機能	XシリーズIPM	VシリーズIPM
過電流保護	○	○
短絡保護	◎ 高速化 (1 μs)	○ (3 μs)
チップ過熱保護 (最小動作温度)	◎ (175 °C)	○ (150 °C)
電源電圧低下保護	○	○
アラーム出力	◎ 2 ms, 4 ms, 8 ms 識別幅=1.1 ms以上	○ 2 ms, 4 ms, 8 ms 識別幅=0.1 ms
温度ワーニング出力	◎ (特定型式)	×
アラーム時ブレーキ部独立動作	◎	×

○：機能あり，×：機能なし
 ◎：従来品VシリーズIPMからの改善ポイント

立動作を設けた。従来の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、下アームすべての動作を停止する回路ロジックとなっていた。この場合、ブレーキ部の動作も停止してしまうため、回転中のモータにおいて発生するエネルギーをブレーキ回路で再生できず、P-N間電圧が上昇してしまうという問題があった。XシリーズIPMでは、下アームのインバータ部が異常を検知してアラーム出力したときでも、ブレーキ部が動作できるようにし、上述の問題を解決した。これにより、モータからの電力再生による主電源のP-N間電圧の上昇を抑制し、半導体素子の過電圧破壊を防ぐことができる。なお、ブレーキ部の異常時には従来通りブレーキ部ととも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。

3.3 温度ワーニング出力機能（一部機種に適用）

XシリーズIPMは、温度ワーニング出力機能を業界で初めて搭載した。この出力機能は、IGBTチップの温度をモニタし、所定の温度以上になると、チップ過熱状態であることをIPMの外部に警報として知らせる。図6に、温度ワーニング出力機能の動作波形を示す。チップの過熱保護機能は、IGBTのチップ温度が175℃を超えると動作し、アラームを出力するとともにスイッチング動作を停止する。一方、温度ワーニング出力機能においては、温度ワーニングを出力している間は、IGBTのスイッチング動作を継続することができる。具体的には、工作機械、エレベータなどの装置が冷却能力不具合（フィンの目詰まり、ファ

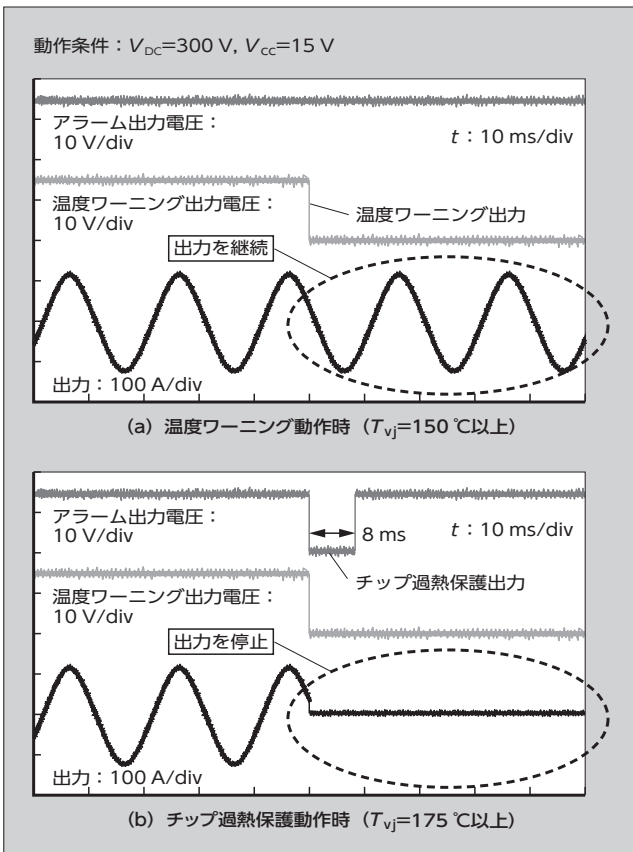


図6 温度ワーニング出力機能の動作波形

ンの故障、コンパウンドの枯渇など）となり、XシリーズIPM内部のIGBTのチップ温度が150℃を超えると温度ワーニング信号を装置側へ出力する。この信号を受けた装置は、IPMに加わる負荷電流を軽減するなどの方法でIGBTのチップ温度が175℃を超えないようにして装置の動作停止を回避し、稼働を続け適切なタイミングで装置メンテナンスを行うことができる。

4 高温動作化と損失低減の効果

表3に、XシリーズIPMとVシリーズIPMの動作温度の比較を示す。XシリーズIPMでは、連続動作時の T_{vjop} をVシリーズIPMの125℃から150℃へ拡大し、最大チップ接合温度 T_{vjmax} をVシリーズの150℃から175℃へ拡大している。このような高温動作を実現するために、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技術をXシリーズIPMにも適用した。さらに、IPMに内蔵している制御ICも、温度の影響を受けにくい回路方式や高温時のエレクトロマイグレーションを考慮したレイアウト設計を行うことにより、高い温度での動作を可能にしている。その結果、電力変換装置においては、従来よりも厳しい負荷条件や低い放熱設計での適用が可能となっている。

代表的な電力変換装置であるインバータにIPMを搭載したときの、インバータ出力電流とチップ接合温度の比較を図7に示す。XシリーズIPMでは、連続動作時のIGBTチップ接合温度の拡大と発生損失の低減により、V

表3 動作温度比較

項目	XシリーズIPM	VシリーズIPM
最大ケース温度 T_{cmax}	125℃	110℃
連続動作時チップ接合温度 T_{vjop}	150℃	125℃
最大チップ接合温度 T_{vjmax}	175℃	150℃

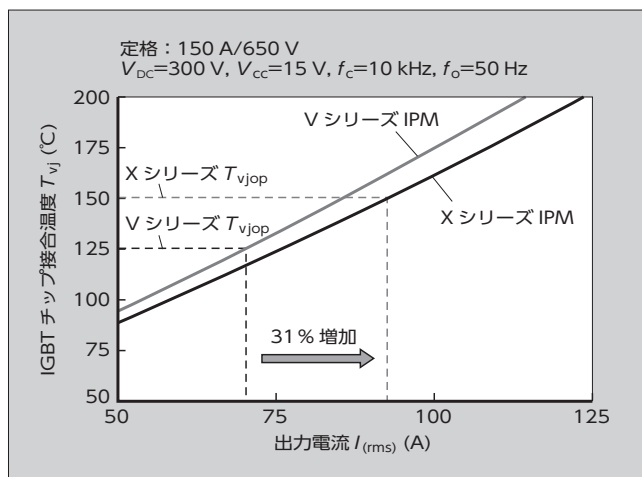


図7 インバータ出力電流とIGBTチップ接合温度

シリーズ IPM に比べて出力電流が約 31% 増加できる。

5 あとがき

第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPMについて述べた。本製品では、最新世代のXシリーズIGBT、FWDおよび新制御ICの開発に加え、高放熱・高信頼性パッケージの採用によって、小型化、低損失化、高性能化を同時に達成することができた。従来製品から第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPMへの置換えにより、電力変換装置の高効率化、小型化、コストダウンが可能となるため、今後の電力変換装置のさらなる普及に寄与でき、世界的なエネルギー問題の解決にも大いに貢献できる。

今後も富士電機では、市場要求を満足する製品開発に注力していく所存である。

参考文献

- (1) 山野彰生ほか. 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュール. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.256-260.
- (2) 清水直樹ほか. インテリジェントパワーモジュール「VシリーズIPM」. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.384-388.

- (3) Kawabata, J. et al. "The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems". Proceeding of PCIM Europe 2015.



皆川 啓

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。



森 貴浩

産業IPM用ドライバーIC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開発統括部デバイス開発部。



大瀬 智文

インテリジェントパワーモジュールのパッケージ設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部パッケージ開発部。





*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。