

大容量第 6 世代 IGBT モジュールの系列拡大

Expanded Lineup for High-Power 6th Generation IGBT Module Families

山本 拓也 Takuya Yamamoto

吉渡 新一 Shinichi Yoshiwatari

市川 裕章 Hiroaki Ichikawa

富士電機は、拡大を続ける風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギー分野に適用するため、大容量 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの系列拡大を行っている。大容量 IGBT モジュールは、第 6 世代「V シリーズ」IGBT を搭載し、チップ最大接合温度 175℃における動作を保証するとともに、業界最高水準の低オン電圧と低スイッチング損失を達成した。また、超音波端子接合技術や高信頼性鉛フリーはんだ材の適用など最新のパッケージ技術を適用し、従来より高い信頼性を確保した。

To respond to growing demand in the renewable energy sector, including wind and solar power, Fuji Electric has expanded the lineup of modules in its high-power IGBT (insulated gate bipolar transistor) module families. These new high-power modules feature 6th-generation “V-Series” IGBTs. Operation is guaranteed at maximum junction temperatures up to 175°C, and the modules deliver industry leading low on-voltage and low switching loss. Reliability is higher than conventional products due to the application of the latest packaging technology, including ultrasonic welded terminals and highly reliable lead-free solder.

1 まえがき

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールは、低損失性、高破壊耐量、駆動回路設計の容易さなどの利点から広く普及している。高耐圧・大容量分野においても、これまで広く適用されてきた GTO (Gate Turn-off) サイリスタから IGBT モジュールへ置き換えられてきており、大容量インバータや高圧インバータ装置などに広く適用されている。

近年、地球温暖化防止に向けて、再生可能エネルギー (風力発電・太陽光発電) の市場が急速に伸びている。特にこの分野では、電力変換装置の大容量化が進み、大容量 IGBT モジュールのニーズは非常に拡大している。これまで富士電機では、この分野への適用を狙い、HPM (High Power Module) および PrimePACKTM を製品展開してきた^{(1),(2)}。

このたび、多様化する顧客ニーズに応えるため、HPM および PrimePACKTM の系列拡大を行った。本製品は第 6 世代「V シリーズ」IGBT⁽³⁾ を搭載し、業界最高水準の低オン電圧と同時に、低スイッチング損失を達成した。さらに最新のパッケージ技術を適用することで、高パワー密度かつ高信頼性も実現した。

本稿では、大容量第 6 世代 IGBT モジュール “V シリーズ HPM Family” の概要および特性について紹介する。

2 製品系列

図 1 に、V シリーズ HPM Family のパッケージ外観を

示す。PrimePACKTM は、2 in1 およびチョッパモジュールの回路構成で、1,200 V および 1,700 V 耐圧クラス、電流容量 600 ~ 1,400 A で構成している。HPM は、1 in1 および 2 in1 モジュールの回路構成で、1,200 V および 1,700 V

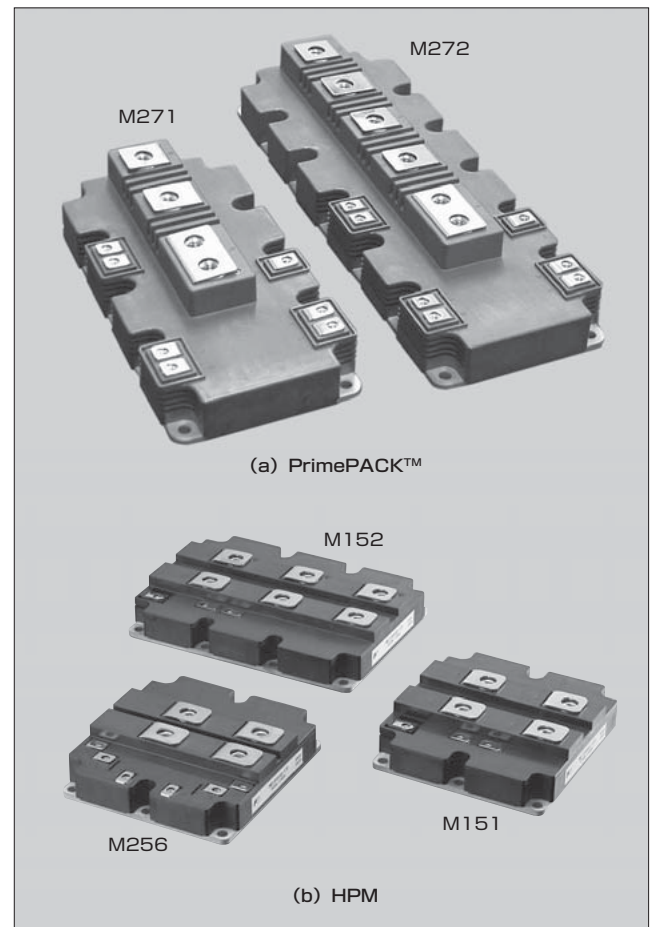


図 1 V シリーズ HPM Family のパッケージ外観

〈注〉 PrimePACKTM : Infineon Technologies AG の商標または登録商標

表 1 V シリーズ HPM Family 製品系列

	製品系列	製品型式	定格電圧 (V)	定格電流 (A)	回路構成	パッケージ型式	パッケージサイズ (mm)	絶縁基板	ベース材料 ベース厚	
PrimePACK™	E-type	2MBI600 VXA-120E-50	1,200	600	2 in 1	M271	172×89×38	Al ₂ O ₃	銅 3 mm	
		2MBI900 VXA-120E-50		900						
	P-type	2MBI900 VXA-120P-50	1,700	1,400		M272	250×89×38			
		2MBI1400 VXB-120P-50		650						
	E-type	2MBI650 VXA-170E-50	1,000	1,000		M271	172×89×38			
		2MBI1000 VXB-170E-50								
		2MBI1000 VXB-170EA-50								
	P-type	2MBI1400 VXB-170E-50	1,400	1,400		M272	250×89×38			
		2MBI1400 VXB-170P-50								
	E-type	1MBI650 VXA-170EH-50	1,700	650		チョッパ	M271			172×89×38
1MBI650 VXA-170EL-50										
1MBI1000 VXB-170EH-50		1,000			M272		250×89×38			
1MBI1000 VXB-170EL-50										
産業用HPM	TBD*	1MBI1200 VC-120*	1,200	1,200	1 in 1	M151	130×140×38	Si ₃ N ₄	銅 5 mm	
		1MBI1600 VC-120*		1,600						
		1MBI2400 VC-120*		2,400						
		1MBI2400 VD-120*		2,400						
		1MBI3600 VD-120*		3,600						
		2MBI600 VG-120*		600		2 in 1	M256			130×140×38
		2MBI800 VG-120*		800						
		2MBI1200 VG-120*		1,200						
	E-type	1MBI1200 VC-170E	1,700	1,200	1 in 1	M151	130×140×38			
		1MBI1600 VC-170E		1,600						
		1MBI2400 VC-170E		2,400						
		1MBI2400 VD-170E		2,400						
		1MBI3600 VD-170E		3,600						
2MBI600 VG-170E		600		2 in 1		M256	130×140×38			
2MBI800 VG-170E		800								
2MBI1200 VG-170E		1,200								
車両用HPM		E-type		1MBI1200 VR-170E		1,700	1,200	1 in 1	M151	130×140×38
	1MBI1600 VR-170E		1,600							
	1MBI2400 VR-170E		2,400							
	1MBI2400 VS-170E		2,400							
	1MBI3600 VS-170E		3,600							
	2MBI600 VT-170E		600	2 in 1	M256		130×140×38			
	2MBI800 VT-170E		800							
	2MBI1200 VT-170E		1,200							

* TBD : To Be Determined

耐圧クラス、電流容量 600 ~ 3,600 A で構成している。表 1 に、V シリーズ HPM Family の製品系列一覧を示す。

3 電気的特性

V シリーズ HPM Family の系列は、V シリーズ IGBT を搭載することにより、瞬間的な異常状態についてはチップ最大接合温度 $T_{jmax}=175^{\circ}C$ までの非連続動作を保証し、通常の運転状態については動作温度 $T_{jp}=150^{\circ}C$ を保証し

ている。高温動作時の信頼性および破壊耐量を向上させることで、これらの温度を第5世代「U シリーズ」IGBT モジュールより、それぞれ 25℃ 高くすることができた。

3.1 IGBT チップ特性

大容量 IGBT モジュールは大電流を瞬時に遮断するため、ターンオフ時に発生するサージ電圧が大きくなる。V シリーズ HPM Family では、従来の V シリーズの IGBT チップの製品系列 (E-type) に加え、大容量分野向けに

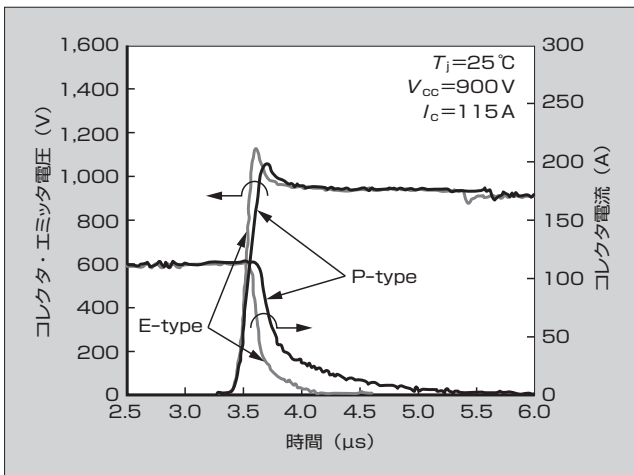


図2 IGBT ターンオフスイッチング波形比較

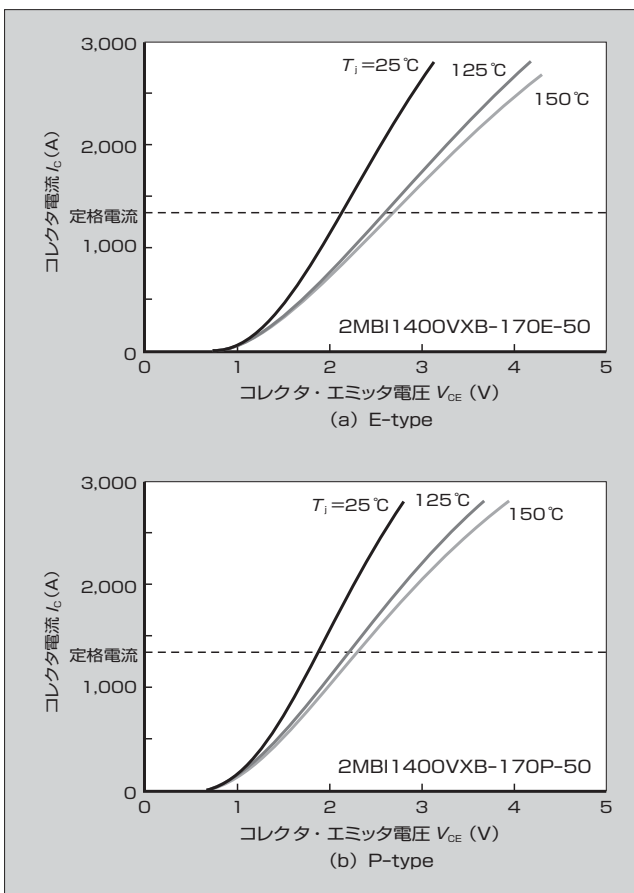


図3 $V_{CE(sat)}$ - I_c 特性

IGBT チップ特性の調整を行い、ソフトスイッチングの特徴を持つ IGBT チップの製品系列 (P-type) を新たに開発した。図 2 に、1,700 V-IGBT チップにおける、E-type と P-type のターンオフ時のスイッチング波形比較を示す。E-type と比較して P-type の方がターンオフ時の di/dt が遅く、ターンオフサージ電圧の低減を達成している。次に、1,700 V/1,400 A モジュールを例にとり、電気的特性について紹介する。

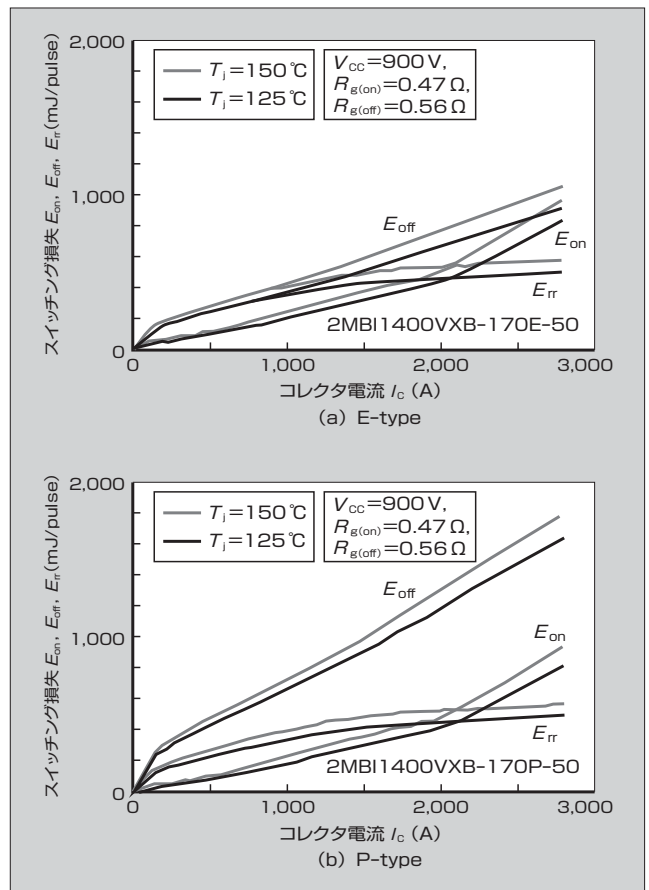


図4 スwitching損失－電流依存性

3.2 V-I 特性

図 3 に、モジュールでの $V_{CE(sat)}$ - I_c 特性を示す。E-type と P-type を比較すると、定格電流 $I_c=1,400$ A, $T_j=125^\circ\text{C}$ において、P-type の方がおよそ 0.4 V 低い特性を示している。

3.3 スwitching特性

図 4 に、スイッチング損失－電流依存性を示す。ターンオン損失および逆回復損失においては、E-type と P-type は同じであるが、ターンオフ損失は P-type の方がおよそ 1.8 倍大きくなっている。

前述のように、V シリーズ HPM Family では IGBT チップ特性の異なる 2 種類の製品系列があるので、顧客の駆動条件に適した製品を提供することができる。

4 パッケージ構造

再生可能エネルギー分野などにおける電力変換装置は、電力の安定供給のため、高い信頼性が要求とされる。V シリーズ HPM Family は、長期信頼性を確保するため、最新のパッケージ技術を採用している。

図 5 に、IGBT モジュールの概略断面図を示す。IGBT モジュールに通電・遮断の電気的負荷を与えると、接合部において、熱ストレスが発生する。各接合部に熱膨張係

数差が少ない材料を適用することで、高い温度サイクル耐量を確保することができる。表 2 に、V シリーズ HPM Family に適用した技術および材料を示す。PrimePACK™ は、超音波端子接合技術および高信頼性鉛フリーはんだ材を適用し、従来製品より高い信頼性を達成している。HPM は 5mm 厚ベースの適用、また車両用途への適用を狙い、AlSiC ベースを適用しさらなる長期信頼性を達成している。

4.1 超音波端子接合技術の適用

図 6 に、超音波端子接合の外観と断面を示す。本製品は、超音波端子接合法による銅端子と銅回路パターンの直接接合を実施している。従来のはんだ接合構造においては、はんだ材と銅材の熱膨張係数差により、はんだ層に最も大きな応力が集中する。このため、はんだ層にクラックが発生して銅端子が取れてしまうという不具合が起こることがある。図 7 に、温度サイクル試験（試験条件：-40 ~ +150℃の繰返し）前後の銅端子引張強度試験の比較結果を示す。従来はんだ接合では、300 サイクル後には、初期に比べて約 50% の引張強度の低下が確認された。これに対

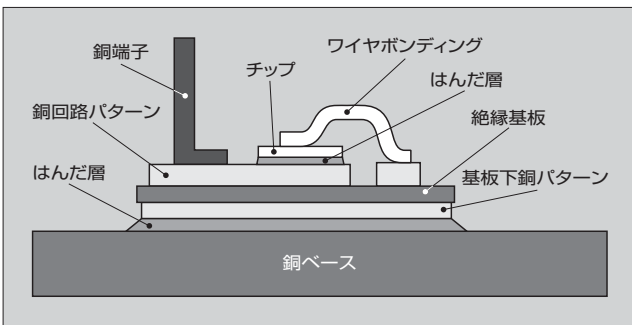


図 5 IGBT モジュールの概略断面図

表 2 V シリーズ HPM Family 適用技術および材料

	PrimePACK™	HPM	
		産業用	車両用
端子接合方法	超音波接合	はんだ接合	はんだ接合
絶縁基板	Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄	AlN
絶縁基板下はんだ材	Sn-Sb	Sn-Pb	Sn-Pb
ベース材料	銅	銅	AlSiC
ベース厚	3mm	5mm	5mm

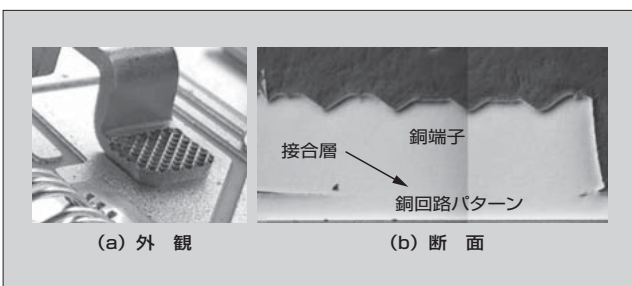


図 6 超音波端子接合の外観と断面

して超音波接合では、引張強度の低下がほとんど見られない。これは、超音波端子接合では、銅端子と銅回路パターンを直接接合するので、接合面の熱膨張係数差がないためである。

4.2 パワーサイクル耐量の向上

図 5 に示すように、銅ベースと基板下銅パターンの間には、温度サイクルによるストレスでクラックが発生することがある。PrimePACK™ では、耐クラック性の高い Sn-Sb はんだを適用することで、高い温度サイクル耐量を実現している。

車両用 HPM では、さらなる高信頼性の確保のため、絶縁基板に AlN 基板、ベース材料に AlSiC ベースを適用している。AlSiC は、Al と SiC の複合材料であり、熱膨張率が AlN 基板に近いので、銅ベースの場合と比較して、ヒートサイクル耐量やパワーサイクル耐量の向上を達成した。図 8 に示す実機動作を模擬した試験では、温度サイクル (ΔT_c パワーサイクル) 耐量の向上を実現した。V シリーズ HPM Family は、 $\Delta T_c=80^\circ\text{C}$ の条件で 10,000 サイクル以上の実力があり、従来品に対して 2 倍以上の ΔT_c パワーサイクル耐量を実現している。

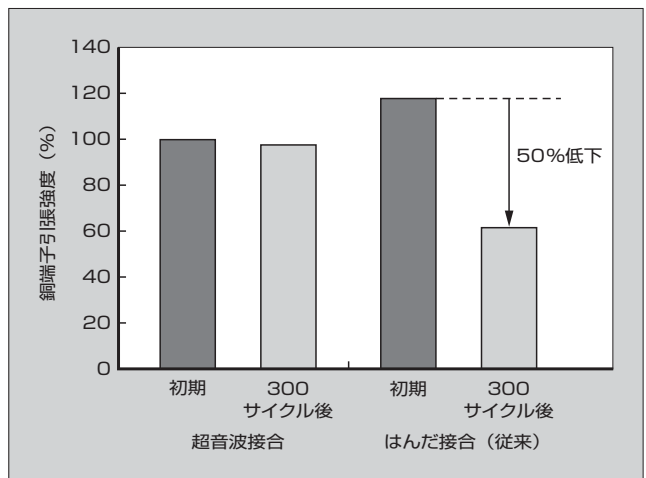


図 7 銅端子引張強度試験結果

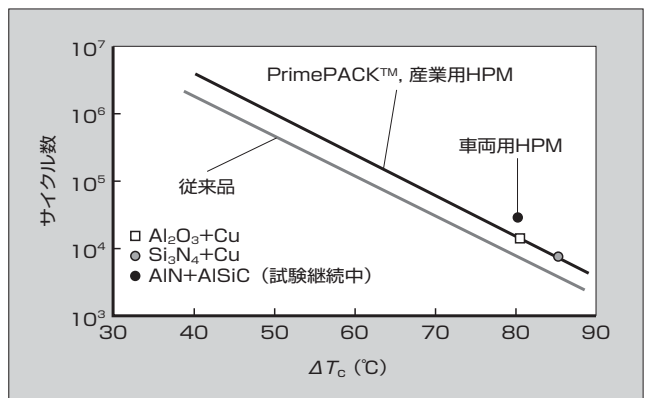


図 8 ΔT_c パワーサイクル耐量

4.3 モールドケースの耐環境性能改善

モールドケースの表面が高電界下に置かれている状態において、モールドケースの表面に付着した粉塵（ふんじん）や水分によって表面が炭化して炭化導通路（トラック）が形成される。このため、絶縁性が低下して絶縁破壊に至ることがある。風力・太陽光発電装置は、塵埃（じんあい）や塩分を多く含み湿度も高い環境に設置されることが多い。IGBT モジュールをこのような環境下でも高い信頼性を維持して使用できるようにするには、炭化導通路を形成しにくいモールドケースの開発が必須である。本製品は、高い比較トラッキング指数 [CTI (Comparative tracking index) ≥ 600] を持つモールド樹脂を採用することで、高いトラッキング性能を確保している。

4.4 内部インダクタンスの低減

3章で紹介したように V シリーズ HPM Family は、大容量分野に適した電気的特性を実現している。大容量分野に適用される電力変換装置の多くは、瞬時に大電流を遮断する性能が要求される。そのためには、製品内部のインダクタンス L_m を低減してサージ電圧を下げるのが非常に重要である。本製品系列では、主端子のコレクタ端子とエミッタ端子を近接させることで、磁界の相互作用を積極的に活用し、 L_m を低減している。

5 あとがき

本稿では、「V シリーズ」IGBT を搭載し、かつ信頼性を大幅に改善した“V シリーズ HPM Family”について紹介した。本モジュールは、ニーズが多様化している大容量分野に加え、急速に市場が伸びている再生可能エネルギー分野に幅広く対応できる製品群であることを確信している。

今後は、さらなるニーズに応えられるように半導体技術およびパッケージ技術のレベルを高め、パワーエレクトロ

ニクスの発展に貢献する新製品の開発を行っていく所存である。

参考文献

- (1) 山本拓也ほか. 新型大容量 2 in 1 IGBT モジュール. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.388-392.
- (2) 西村孝司ほか. IGBT ハイパワーモジュール. 富士時報. 2008, vol.81, no.6, p.390-394.
- (3) 高橋孝太ほか. IGBT モジュール「V シリーズ」の系列化. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.380-383.
- (4) Morozumi, A. et al. Reliability of Power Cycling for IGBT Power Semiconductor Module. Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Cof. 36th. 2001. p.1912-1918.
- (5) 木戸和優ほか. IGBT モジュール用超音波接合技術の開発 (第一報). Conf. Rec.



山本 拓也

IGBT モジュールの開発・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松本工場技術統括部モジュール技術部。



吉渡 新一

IGBT モジュールの開発・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松本工場技術統括部モジュール技術部チームリーダー。



市川 裕章

IGBT モジュールの開発・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松本工場技術統括部モジュール技術部。





*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。