

第7世代「Xシリーズ」産業用 1,200 V/2,400 A RC-IGBT モジュール

7th-Generation “X Series” 1,200-V / 2,400-A RC-IGBT Modules for Industrial Applications

掛布 光泰 KAKEFU, Mitsuhiro

山野 彰生 YAMANO, Akio

平田 朋也 HIRATA, Tomoya

IGBT モジュールの小型化や高信頼性化といった市場要求に応えるため、IGBT と FWD をワンチップ化した RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT) を開発した。第7世代「Xシリーズ」のチップ技術およびパッケージ技術と RC-IGBT の技術を組み合わせ、第7世代「Xシリーズ」産業用 1,200 V RC-IGBT モジュールを系列化し、2,400 A を加えて定格電流を拡大した。これにより、従来製品と比較して実動作時のチップ接合温度や接合温度上昇を大幅に改善し、電力変換装置のさらなる出力向上や小型化、高信頼性化に貢献する。

In order to meet the market demand for smaller and more reliable IGBT modules, Fuji Electric has developed reverse-conducting IGBTs (RC-IGBTs), which integrate IGBTs and FWDs on a single chip. Specifically, we created a line-up of 7th-generation “X Series” 1,200-V RC-IGBT modules for industrial applications that combine 7th-generation “X Series” chip and packaging technologies with RC-IGBT technology. More recently, we have enhanced the line-up by adding 2400-A products to increase the current rating. This enhancement substantially improves chip junction temperature and junction temperature rise during operation compared with conventional products. This contributes to further output improvement, miniaturization, and higher reliability for power conversion systems.

① まえがき

近年、地球温暖化対策や安全・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す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。中でも、産業や民生、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として、パワー半導体の重要性が増している。

富士電機は、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た。以来、IGBT モジュールの小型化、低損失化、高信頼化によって電力変換装置の小型化や低コスト化、高性能化に貢献してきた。さらなる貢献のために IGBT モジュールを従来よりも小型化しようとする、パワー密度の増大による IGBT 素子や還流ダイオード FWD (Free Wheeling Diode) 素子の動作温度の上昇や信頼性の低下を招く。そのため、高い信頼性を保ち、かつ IGBT モジュールを高パワー密度化するためには、チップおよびパッケージの技術革新が不可欠である。

富士電機はチップおよびパッケージの技術革新を行い、第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュールを製品化し、IGBT モジュールの低損失化と高信頼化による高パワー密度化を実現している⁽¹⁾⁽²⁾。さらに、IGBT と FWD をワンチップ化した RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT: 逆導通 IGBT) を開発し、発生損失を低減しつつチップ数およびトータルチップ面積を低減した。⁽³⁾⁽⁴⁾

X シリーズ RC-IGBT モジュールは、X シリーズ IGBT モジュールのチップ技術とパッケージ技術に RC-IGBT 技術を加えることで、さらなる高パワー密度化による小型化を実現した。今回、RC-IGBT を搭載した 1,200 V/2,400 A 定格 PrimePACKTM 3+ を開発し、系列に加えた。

② 第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュールの特徴

図1に、Xシリーズ RC-IGBT の概略図と等価回路を示す。電力変換装置として広く用いられている電圧型インバータでは、IGBT と FWD を逆並列に接続する必要がある。従来は、IGBT と FWD の二つのチップが必要であったが、RC-IGBT では、一つのチップに IGBT の動作領域と FWD の動作領域を作り込んでいる。

X シリーズ RC-IGBT では X シリーズのチップ技術により、第6世代「Vシリーズ」IGBT と比較してさらなる

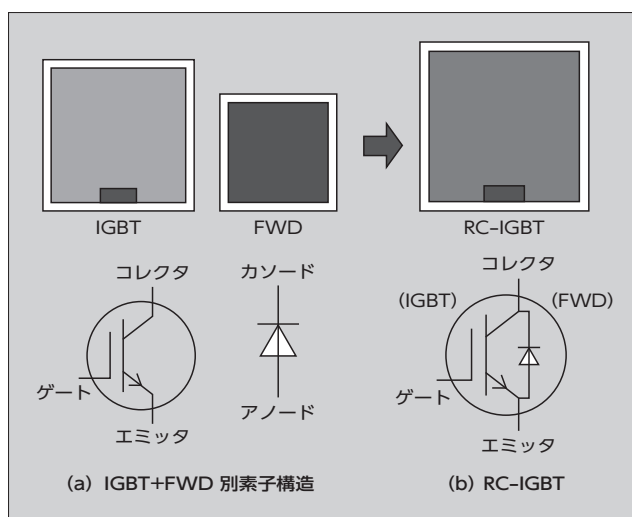


図1 第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT の概略図と等価回路

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

微細化を行い、コレクタ・エミッタ飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ を大幅に低減した。また、最先端の薄ウェーハ加工技術を適用することで、 $V_{CE(sat)}$ とスイッチング損失とのトレードオフ関係を改善した。一般に薄ウェーハを用いると、ターンオフ時の電圧振動や耐圧の低下が懸念されるが、Xシリーズ RC-IGBT ではチップ構造を最適化することで、電圧振動や耐圧低下を抑制した。

さらに、Xシリーズ IGBT モジュールのパッケージ技術の一つである高放熱絶縁基板を採用し、熱抵抗を大幅に低減した。また、ワイヤボンディングの最適化や高強度はんだ、高耐熱シリコンゲルの採用により、接合温度 175℃での連続動作を保証するとともに高信頼性も確保した。

これらの技術を採用することで、RC-IGBT モジュールは、IGBT と FWD の二つのチップを組み合わせた従来の IGBT モジュールよりも、同一パッケージサイズで高い定格電流を実現した。⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾

③ 製品ラインアップ

表1に、Xシリーズ RC-IGBT モジュールのラインアップを示す。

また、表2に今回新たに系列化したXシリーズ RC-IGBT モジュール PrimePACK™3+ の外観写真を示す。従

来の定格電流 1,800 A の Xシリーズ IGBT モジュールと同じパッケージサイズで、RC-IGBT モジュールは定格電流 2,400 A を実現している。

④ 第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュール PrimePACK™3+ の特性

(1) ターンオフ損失

図2に、Xシリーズ RC-IGBT モジュールの $V_{CE(sat)}$ と

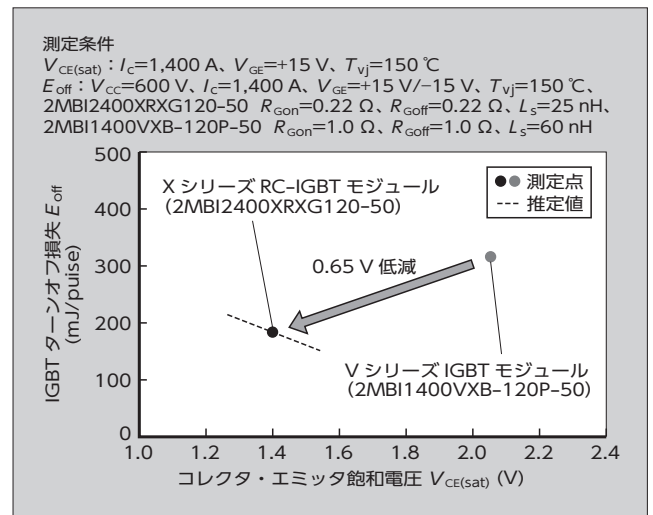


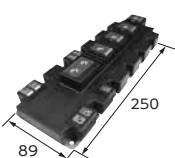
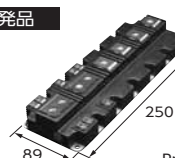
図2 IGBT トレードオフ特性

表1 Xシリーズ RC-IGBT モジュールのラインアップ

製品名	製品型式	定格電圧	定格電流	備考
Small-PIM2	7MBR50XRKD120-50	1,200 V	50 A	ソルダーピン
	7MBR50XRKB120-50			プレスフィットピン
PC3	6MBI250XRBE120-50		250 A	ソルダーピン
	6MBI250RXE120-50			プレスフィットピン
DualXT	2MBI1000XRNE120-50		1,000 A	ソルダーピン
	2MBI1000XRN120-50			プレスフィットピン
PrimePACK™3+	2MBI2400XRKG120-50		2,400 A	—
DualXT	2MBI800XRNE170-50	1,700 V	800 A	ソルダーピン
	2MBI800XRN170-50			プレスフィットピン
PrimePACK™3+	2MBI2200XRKG170-50		2,200 A	—

*PrimePACK™: Infineon Technologies AG の商標または登録商標

表2 製品の外観

		定格電流 (A)		
		1,400	1,800	2,400
1,200 V	Xシリーズ	X-IGBT + X-FWD		X-RC-IGBT
	Vシリーズ	V-IGBT + V-FWD		
製品外観	従来品			
		PrimePACK™3		PrimePACK™3+

*PrimePACK™: Infineon Technologies AG の商標または登録商標

ターンオフ損失のトレードオフ特性を示す。Xシリーズ RC-IGBT モジュールは、Vシリーズ IGBT モジュールと比較して、飽和電圧を0.65V低減するとともに、ターンオフ損失を42%低減し、大幅にトレードオフ特性を改善した。これにより、高効率化と高電流密度化を実現した。

一方、従来のVシリーズ IGBT モジュールでは、大電流が流れた場合に出力端子がその配線抵抗によって発熱し、温度が過剰に上昇する懸念があるため出力電流の拡大に制約があった。そこでXシリーズ RC-IGBT モジュールでは、配線抵抗を下げるため従来のVシリーズ IGBT モジュールから外形サイズを変えることなく、出力端子の数を1端子から2端子に増やした。

(2) 出力端子温度

図3に、従来のVシリーズ IGBT モジュールとXシリーズ RC-IGBT モジュールの通電試験時の出力端子温度を測定した結果を示す。Xシリーズ RC-IGBT モジュールは、通電時に1端子当たりの電流を低減することができる。これにより、従来のVシリーズ IGBT モジュールと比較して1,100A通電時の端子温度が51℃低くなり、定格電流が拡大できた。

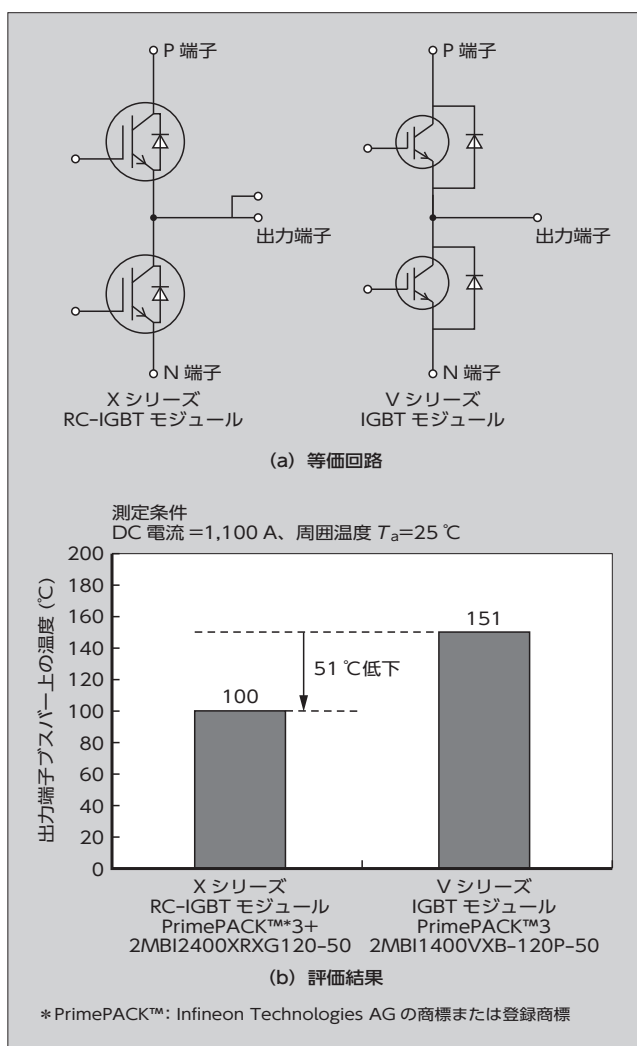


図3 等価回路と端子温度評価結果

計算条件
 $V_{cc}=600\text{V}$, $I_{O(rms)}=1,200\text{A}$, $f_o=50\text{Hz}$, $f_c=3\text{kHz}$, 力率=0.9,
 変調率=1.0, 周囲温度 $T_a=50^{\circ}\text{C}$
 2MBI2400XR XG120-50 $R_{Gon}=0.22\Omega$, $R_{Goff}=0.22\Omega$
 2MBI1400VXB-120P-50 $R_{Gon}=1.0\Omega$, $R_{Goff}=1.0\Omega$

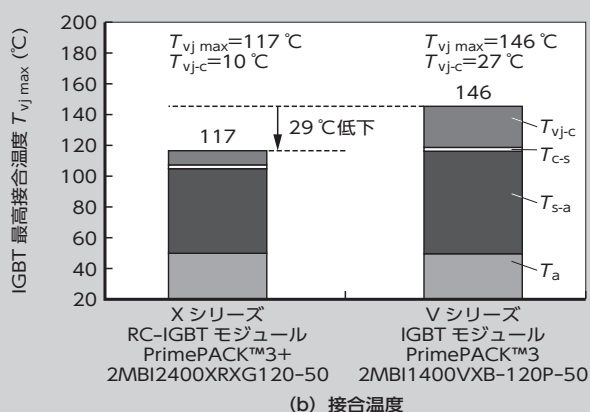
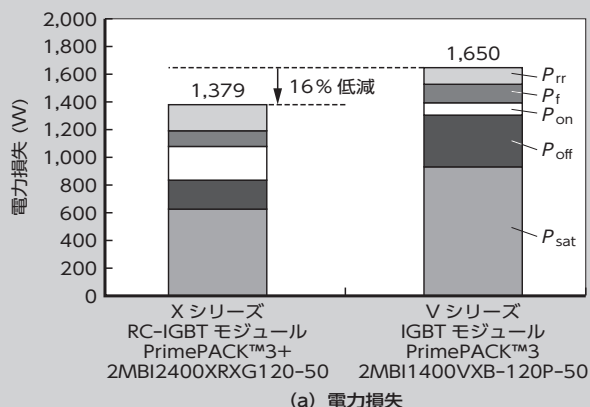


図4 電力損失および接合温度

(3) インバータ搭載時の電力損失と接合温度

図4に、従来のVシリーズ IGBT モジュールとXシリーズ RC-IGBT モジュールを電圧型インバータに搭載したときの電力損失と接合温度 T_{vj} およびジャンクション-ケース間温度上昇 T_{vj-c} をシミュレーションで求めた結果を示す。Vシリーズ IGBT モジュールと比較して、同じ条件で電力損失を16%削減した。さらに、Xシリーズのパッケージ技術とRC-IGBTの技術を組み合わせることで熱抵抗を大幅に低くし、 T_{vj-c} が17℃低減できたことにより、最高接合温度 $T_{vj\max}$ を29℃下げることができた。

(4) パワーサイクル耐量

図5に、モータの加減速時などインバータが低周波で動作するときの T_{vj} のシミュレーション結果を示す。従来のIGBT+FWD構造では、IGBTおよびFWDがそれぞれ発熱および放熱を繰り返し、1周期における T_{vj} の最低温度と最高温度の差 ΔT_{vj} は90℃になる。一方、IGBTとFWDの領域をワンチップ化したRC-IGBTでは、素子内のIGBT領域およびFWD領域が交互に発熱する。これにより、RC-IGBTではIGBTで発生した熱がFWD領域にも伝わり、またFWDで発生した熱はIGBT領域にも伝わるため、IGBT+FWD構造と比較して放熱面積の拡大効果が得られことで熱抵抗が低減し、 T_{vj} の温度変化が約1/4

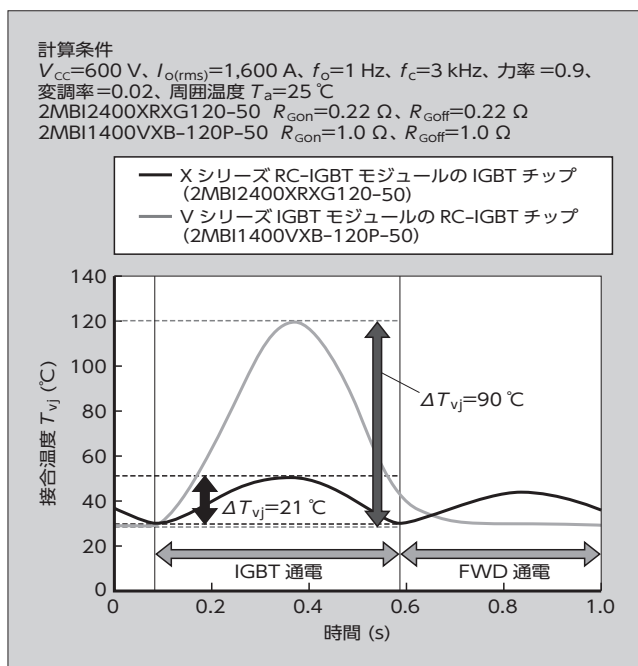
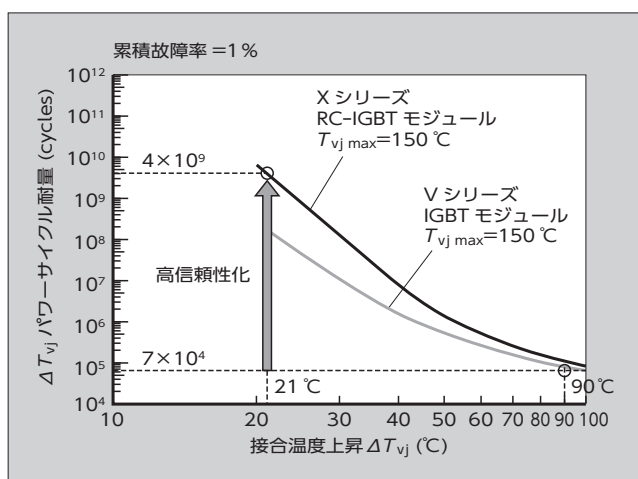
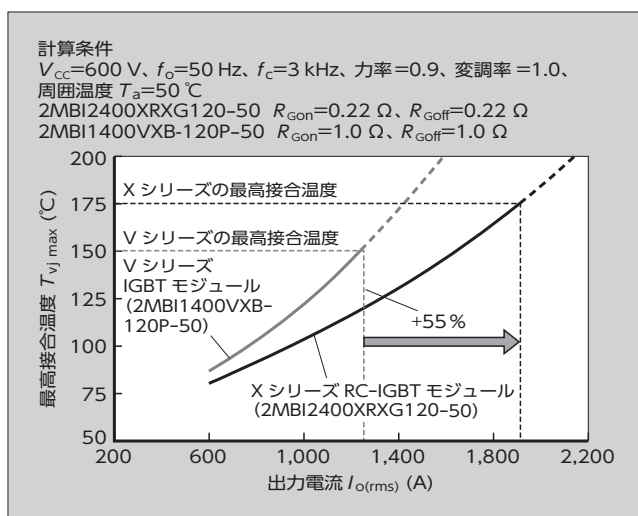
図5 低周波動作時の接合温度 T_{vj} の時間変動図6 ΔT_{vj} パワーサイクル耐量

図7 連続動作時の最高接合温度

と小さくなり、1周期の ΔT_{vj} は21 $^{\circ}\text{C}$ にとどまる。これにより、アルミニウムワイヤ接合部およびシリコンチップ下はんだ接合部への熱ストレスが大幅に緩和する。

図6に ΔT_{vj} パワーサイクル耐量と、今回の低周波動作時の温度上昇計算結果を示す。Xシリーズ RC-IGBT モジュールでは ΔT_{vj} が大幅に低減したので、低周波動作時の ΔT_{vj} パワーサイクル耐量が 7×10^4 cycles から 4×10^9 cycles が増え、信頼性が劇的に向上した。一方、従来と同等のパワーサイクル耐量の条件で使用する場合には高出力化が期待できる。

(5) 出力電流の向上

連続動作についてシミュレーションを行った結果、図7に示すように、電力損失と熱抵抗の低減、ならびに連続動作時の最高接合温度をVシリーズ IGBT モジュールの150 $^{\circ}\text{C}$ からXシリーズ IGBT モジュールでは175 $^{\circ}\text{C}$ に上げることができることによって、同一パッケージにおいて出力電流を55%拡大できる。

また、図8に示すようにインバータが出力電流定格の100%で連続動作したのち200%で3s間の過負荷動作した100%出力電流 I_O と $T_{vj\text{ max}}$ のシミュレーションを行った。その結果、図9に示すように、Xシリーズ RC-IGBT モジュールを用いることで、過負荷動作においても出力電流が54%拡大できることが示された。

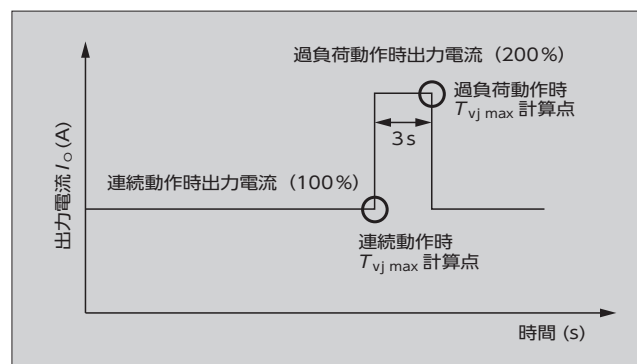


図8 インバータの過負荷時の動作パターン

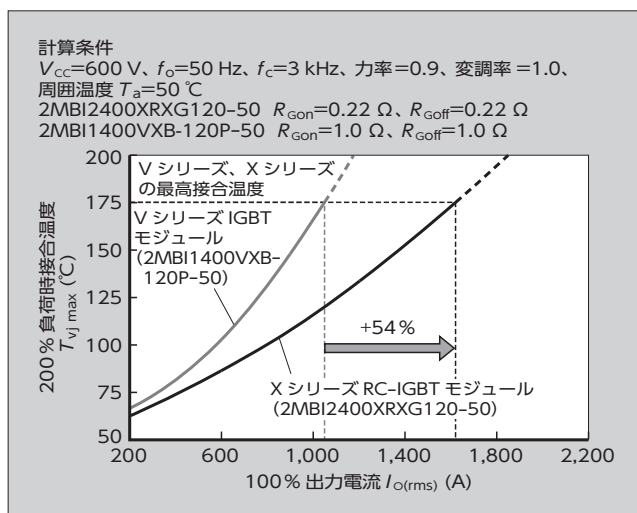


図9 過負荷動作時の最高接合温度

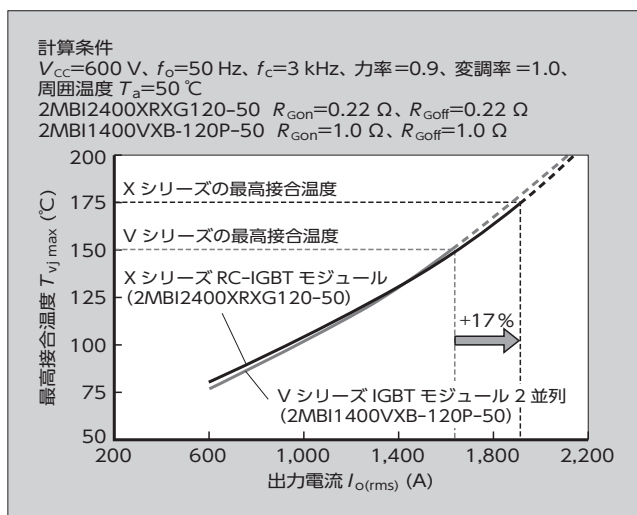


図 10 連続動作時の最高接合温度

図 10 に、連続動作時の I_o と $T_{vj\max}$ のシミュレーション結果を示す。V シリーズ IGBT モジュール 1,400 A を 2 並列する必要があったものが、X シリーズ RC-IGBT モジュール 2,400 A 1 台に置き換えることができ、かつ出力電流を 17% 拡大でき、省スペース化が可能となった。

5 あとがき

第 7 世代「X シリーズ」産業用 1,200 V/2,400 A RC-IGBT モジュールについて述べた。このモジュールを電力変換装置に搭載することにより、これまで実現が困難であった出力電流の拡大を達成し、電力変換装置の小型化や高効率化、高信頼化、低コスト化によりいっそう貢献できると考える。

今後も IGBT モジュールの技術革新を進め、安全・安心で持続可能な社会の実現に向け貢献していく所存である。

参考文献

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

- (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) Takahashi, M. et al. “Extended Power Rating of 1200 V IGBT Module with 7G RC-IGBT Chip Technologies”. Proceeding of PCIM Europe 2016.
- (4) Takahashi, K. et al. “1200 V Class Reverse Conducting IGBT Optimized for Hard Switching Inverter”. Proceeding of PCIM Europe 2014.
- (5) 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.
- (6) 山野彰生ほか. 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュールの系列化. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.233-237.
- (7) Yamano, A. et al. “The Series of 7th-Generation “X Series” RC-IGBT Modules for Industrial Applications”. Proceeding of PCIM Europe 2018.
- (8) Yamano, A. et al. “1,700 V 7th-Generation “X Series” RC-IGBT Modules for Industrial Applications”. Proceeding of PCIM Europe 2019.



掛布 光泰

IGBT 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。



山野 彰生

IGBT 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。



平田 朋也

IGBT 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。



＊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。