第 7 代“X 系列”产业用 RC-IGBT 模块的系列化

7th-Generation “X Series” RC-IGBT Module Line-Up for Industrial Applications

山野 彰生 YAMANO, Akio　　高崎 爱子 TAKASAKI, Aiko　　市川 裕章 ICHIKAWA, Hiroaki

为满足 IGBT 模块小型化、低损耗化、高可靠性化的市场要求，富士电机开发了将 IGBT 和 FWD 单芯片化的 RC-IGBT（逆导型 IGBT），推进了额定电压 1200 V 的第 7 代“X 系列”产业用 RC-IGBT 模块的系列化，并新开发了“Dual XT”。相比第 6 代“V 系列”产业用 IGBT 模块“Dual XT”的最大额定电流 600 A，新产品将额定电流扩大到了 1000 A。而与采用相同封装的传统产品比较，大幅改善了实际运行时芯片的接合温度和接合温度上升的问题。有望实现电力转换装置输出的进一步提高和长寿命化。

In order to meet the market demand of the smaller size, lower power dissipation and higher reliability for IGBT modules, Fuji Electric has developed a reverse conduction insulated gate bipolar transistor (RC-IGBT) that integrates an IGBT and a FWD on a single chip. We have also developed the “Dual XT” to expand the line-up of the 7th-generation “X Series” RC-IGBT module for industrial applications that has a rated voltage of 1,200 V. While the “Dual XT” 6th-generation “V Series” IGBT module for industrial applications had a maximum rated current of 600 A, the new module has a expanded rated current of 1,000 A. Compared with the conventional product, which uses the same package, the new product greatly improves the junction temperature and junction temperature rise of the chip during actual operation. This module will contribute to further increase of the output and extension of service life of the power converters.

1 引言

近年来，为防止全球气候变暖，打造安全、安心、可持续的社会，能够高效利用能源、为节能做贡献的电力电子技术备受期待。其中，作为产业、民生、汽车、可再生能源等多个领域中使用的电力转换装置的关键器件元件，功率半导体的需求日益增加。

富士电机自 1988 年实现功率半导体 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）模块的产品化以来，通过了多项技术革新，推进了 IGBT 模块的小型化、低损耗化和高可靠性化，为电力转换装置的小型化、低成本化和高性能化做出了贡献。但是，如果想要 IGBT 模块进一步小型化，功率密度就会增加，这会引发 IGBT 和回流二极管 FWD（Free Wheeling Diode）运行温度上升，并导致可靠性降低，造成危险。为此，为保持高可靠性，同时实现 IGBT 模块的高功率密度化，芯片和封装的技术革新不可欠缺。

富士电机进行芯片和封装的技术革新，实现了第 7 代“X 系列”IGBT 模块的产品化，并凭借 IGBT 模块的低损耗化和高可靠性化，实现了高功率密度化[1),2)]。而且还进一步开发了将 IGBT 和 FWD 单芯片化的 RC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT：逆导型 IGBT[3),4)]），降低了热损耗，同时减少了芯片数量和总芯片面积。凭借结合了这一芯片技术和封装技术的额定电压为 1200 V 的第 7 代“X 系列”产业用 RC-IGBT（X 系列 RC-IGBT）模块，实现了进一步的高功率密度化。现在，正在推进 X 系列 RC-IGBT 模块的系列化，此次，新开发出搭载了 RC-IGBT 的“DualXT”。

2 第 7 代“X 系列”产业用 RC-IGBT 模块的特点

图 1 中展示了 X 系列 RC-IGBT 的简图和等效电路。作为电力转换装置而被广泛使用的变频器，必须以反并联的方式连接 IGBT 和 FWD 这两个芯片。与此相对，RC-IGBT 将 IGBT 和 FWD 集结于一个芯片上。

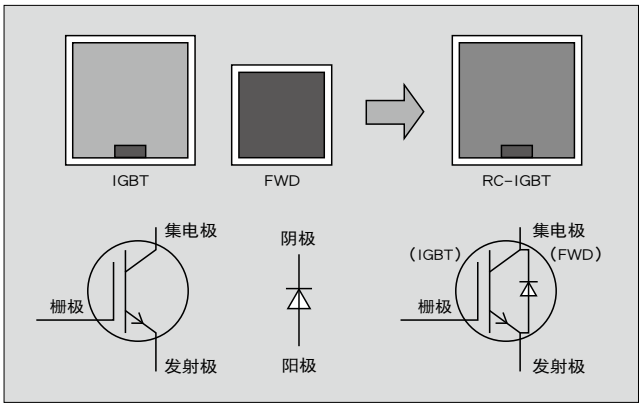

图 1　第 7 代“X 系列”产业用 RC-IGBT 的简图和等效电路

X 系列 RC-IGBT 凭借 X 系列的芯片技术，在第 6 代“V 系列”IGBT 的基础上进一步微细化，大幅降低了集电极 - 发射极饱和电压 $V_{CE\,(sat)}$。并且，通过运用最先进的薄晶圆加工技术，改善了饱和电压与开关损耗的均衡关系。一般情形下，因为使用薄晶圆，关断时的电压振动和耐压的降低令人担忧，但 X 系列 RC-IGBT 通过优化各个结构，抑制了振动和耐压的降低。

并且，采用了 X 系列封装技术之一的高散热绝缘基板，大幅降低了热阻。此外，凭借优化引线焊接和使用高强度焊锡和高耐热硅胶，在保证 175 ℃下连续运行的同时，也确保了高可靠性。

通过采用这些技术，在与传统产品相同的封装尺寸下，相比组合 IGBT 和 FWD 两个芯片的产品，实现了更高的额定电流[5)]。

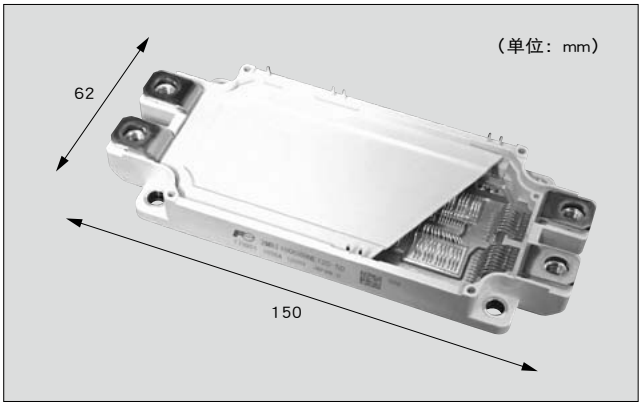

图 2　第 7 代“X 系列”产业用 RC-IGBT 模块“Dual XT”

表 1　“Dual XT”的产品阵容

额定电压 1200 V	额定电流 （A）						
	225	300	450	600	800	900	1000
Dual XT	V 系列 IGBT+ V 系列 FWD						
	X 系列 IGBT+X 系列 FWD						X 系列 RC-IGBT

3　产品阵容

图 2 中展示了新系列 X 系列 RC-IGBT 模块 Dual XT 的外观，**表 1** 中展示了其产品阵容，**表 2** 中展示了其特点。相比第 6 代“V 系列”产业用 IGBT（V 系列 IGBT）模块“Dual XT”的最大额定电流 600 A，第 7 代 X 系列 RC-IGBT 模块的额定电流扩大到了 1000 A。

4　第 7 代“X 系列”产业用 RC-IGBT 模块“Dual XT”的特性

图 3 中展示了 X 系列 RC-IGBT 模块的输出特性。X 系列 RC-IGBT 能用 1 块芯片向正向（IGBT）和反向（FWD）的两方向输出电流。RC-IGBT 在向栅极施加电压、对 IGBT 通电时，可能会出现 IGBT 的电导率调制难以发生的情况。特别是在饱和电压较低的区域中，容易发生骤回现象[6],[7]。针对这一问题，X 系列 RC-IGBT 通过对芯片的各个结构进行优化，消除了骤回现象。

图 4 中展示了 X 系列 RC-IGBT 模块的关断波形。相比 V 系列 IGBT 模块，关断时的浪涌电压降低了约 100 V。此外，观测不到电压振动、穿透波形等异常波形。

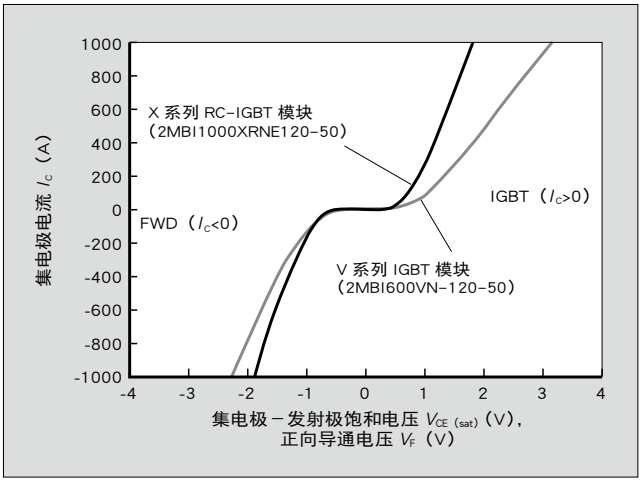

图 3　输出特性

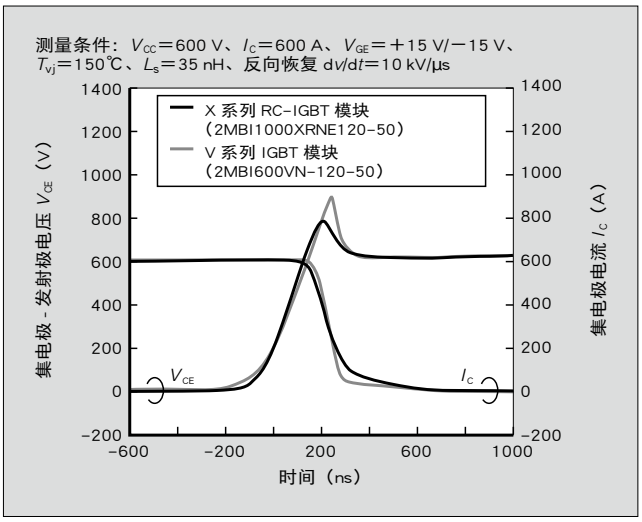

图 4　关断波形

图 5 中展示了 X 系列 RC-IGBT 模块的 IGBT 均衡特性。图中的虚线是利用结构参数控制，调整均衡关系后得到的。相同的开关损耗下，X 系列 RC-IGBT 模块相比 V 系列 IGBT 模块，饱和电压降低了约 0.9 V。

图 6 中展示了 X 系列 RC-IGBT 模块的电力损耗、接合温度 T_{vj} 以及结点－塑壳间的温度上升 ΔT_{vj-c}。通过组合 X 系列的芯片技术和 RC-IGBT 的技术，扩大了最大额定电流，在相同条件下，电力损耗比 V 系列 IGBT 模块减少了 11%。并且，通过组合 X 系列的封装技术和 RC-IGBT 技术，大幅降低了热阻，将最大接合温度 T_{vj} 降至 34 ℃，ΔT_{vj-c} 缩小了 41%。

表 2　“Dual XT”的特点

额定电压	1200 V		
代表型号	2MBI600 VN-120-50	2MBI800XNE120-50	2MBI1000XRNE120-50
系列名称	第 6 代 V 系列 IGBT 模块	第 7 代 X 系列 IGBT 模块	第 7 代 X 系列 RC-IGBT 模块
芯片	V 系列 IGBT＋V 系列 FWD	X 系列 IGBT＋X 系列 FWD	X 系列 RC-IGBT
热阻：$R_{th\ (j-c)}$（a.u.）	1/1.5 （IGBT/FWD）	0.85/1.1 （IGBT/FWD）	0.55/0.55 （IGBT/FWD）

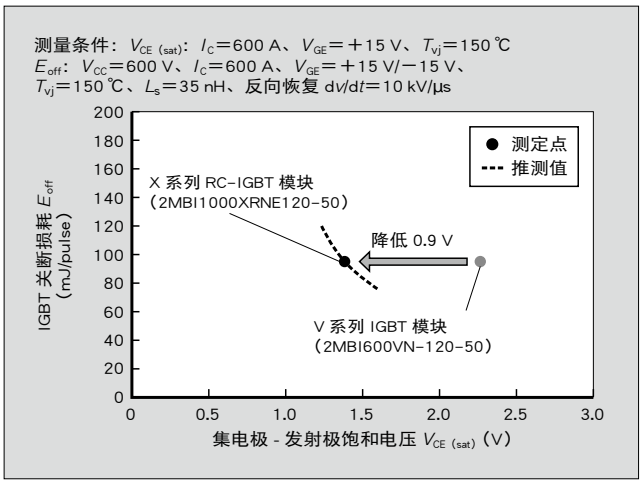

图 5　IGBT 的均衡特性

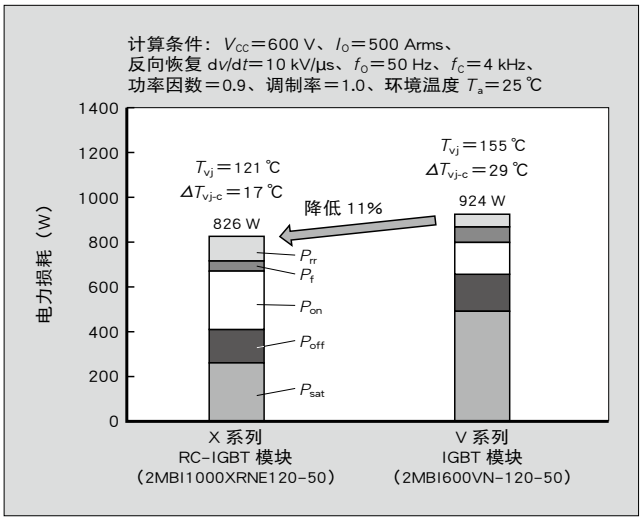

图 6　电力损耗和接合温度

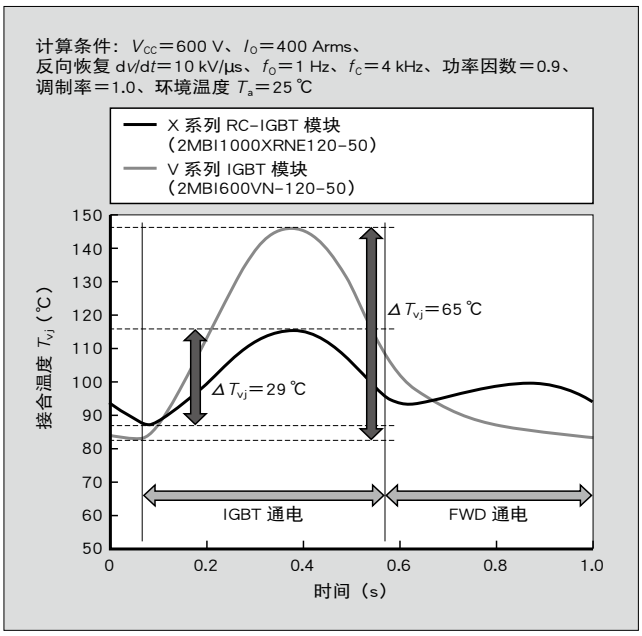

图 7　低频运行时的接合温度 T_{vj} 的时间变化

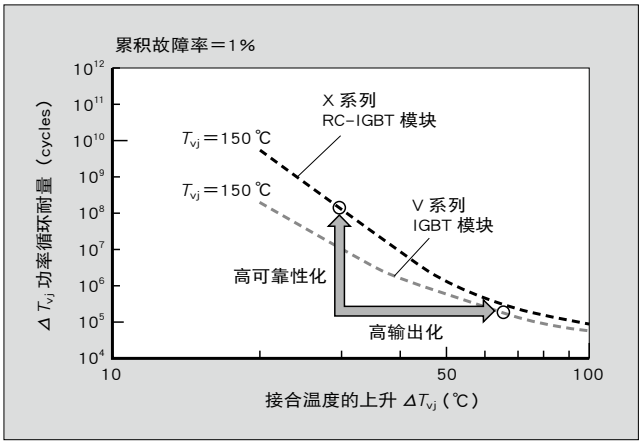

图 8　ΔT_{vj} 功率循环耐量

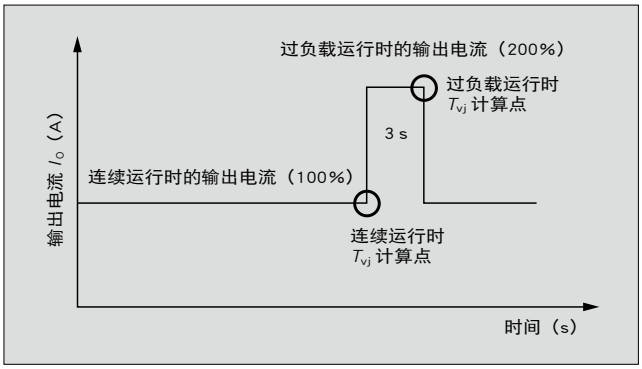

图 9　变频器的连续运行和过负载时的运行类型

图 7 中展示了低频运行时的 Tvj 的时间变化。X 系列 RC-IGBT 模块凭借热损耗和热阻的降低，大幅降低了 T_{vjmax}。并且，RC-IGBT 在同一芯片内对 IGBT 和 FWD 通电，因此温度脉动小。

因此，X 系列 RC-IGBT 模块相比 V 系列 IGBT 模块，接合温度的上升 ΔT_{vj} 也大幅缩小。由此可缓和铝线接合部和硅芯片下焊锡接合部的热应激。**图 8** 中展示了 ΔT_{vj} 功率循环耐量和此次低频运行时的温度上升计算结果。X 系列 RC-IGBT 模块凭借 ΔT_{vj} 的大幅降低，使低频运行时的 ΔT_{vj} 功率循环耐量显著提高。由此，在功率循环耐量与传统产品相同时，可实现高输出，而在输出相同时，则有望实现高可靠性。

图 9 中展示了变频器连续运行时和过负载时的运行类型。**图 10** 中展示了以连续运行时的输出电流为 100% 时，输出电流 I_O 与 T_{vj} 的计算结果。**图 11** 中展示了以 200% 的输出电流过负载运行 3 秒时的 I_O 和 T_{vj} 的计算结果。**图 12** 中展示了过负载运行时的 T_{vj} 为 150 ℃时，通过 FEM (Finite Element Method：有限元素法) 分析得到的等高线图。如**图 10** 所示，在连续运行时，通过降低电力损耗和热阻，并将 X 系列 IGBT 模块的连续运行保证温度从 V 系列 IGBT 模块的 150 ℃提升至 175 ℃，可在相同的封装下，将输出电流扩大 42%。而如**图 11** 所示，即使是过负载运行，X 系列 RC-IGBT 模块的输出电流也扩大了 48%。并且如**图 12** 所示，从通过 FEM 分析得到的等高线图中，我们确认到 X 系列 RC-IGBT 模块相比 V 系列 IGBT 模块，即使输出电流扩大 27%，也能确保相同的 150 ℃的 T_{vj}。还发现凭借芯

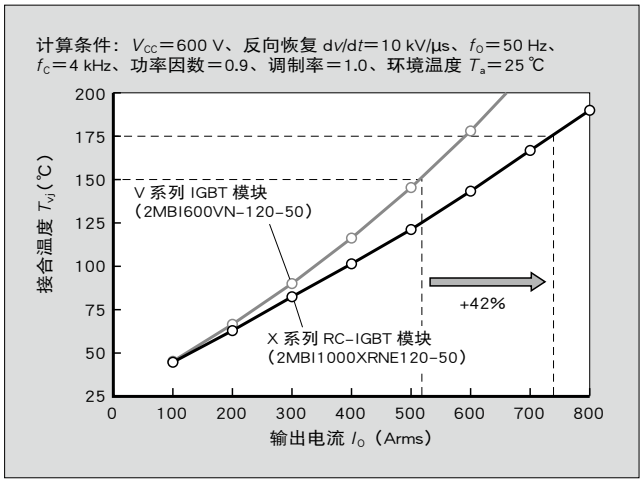

图 10　连续运行时的接合温度

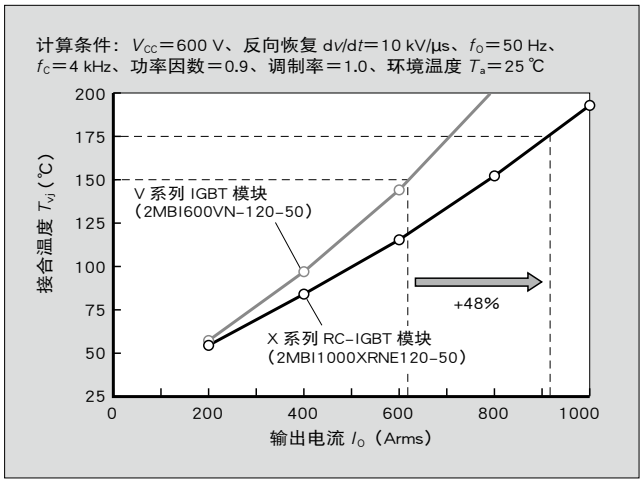

图 11　过负载运行时的接合温度

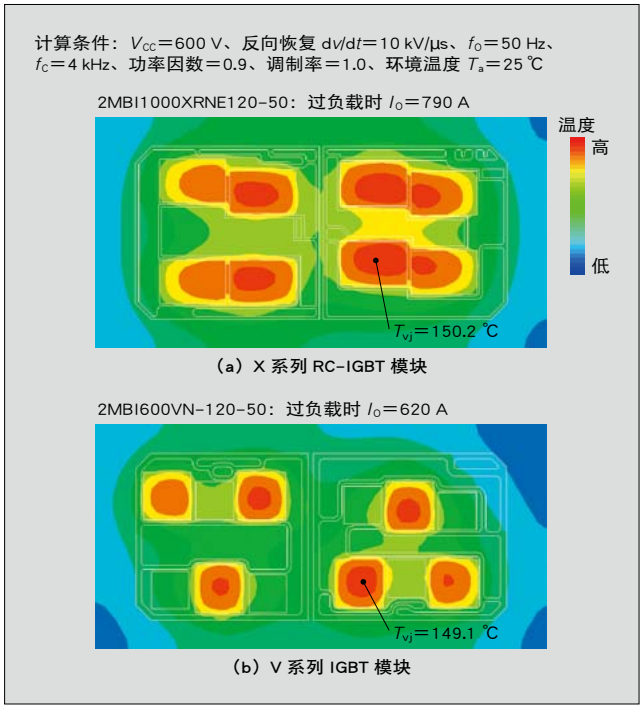

图 12　过负载运行时通过 FEM 分析得到的等高线图

片尺寸和内部布局的优化，温度分布实现了均一化。由此，各种材料的热应激可得到缓和，有望进一步提高可靠性。

5　后记

本文对第 7 代 “X 系列” 产业用 RC-IGBT 模块的系列化进行了介绍。凭借这一模块，可实现过去难以实现的额定电流，将为电力转换装置的小型化和低成本化做出更大的贡献。本公司今后还会继续推动 IGBT 模块的技术革新，为实现安全、安心、可持续发展的社会作出贡献。

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)　川畑润也等. 第 7 代 “X 系列” IGBT 模块. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.1, p.15-19.
(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)　山野彰生等. 第 7 代 “X 系列” 产业用 RC-IGBT 模块. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.1, p.23-27.
(6)　Takahashi, H. et al. “1200 V Reverse Conducting IGBT”, Proceeding of ISPSD 2004. p.133-136.
(7)　M, Rahimo. et al. “The Bi-mode Insulated Gate Transistor (BIGT) A Potential Technology for Higher power Applications”, Proceeding of ISPSD 2009. p.283-286.

山野　彰生
从事 IGBT 模块的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部事业统括部产业模块部。

高崎　爱子
从事 IGBT 模块的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部事业统括部产业模块部。

市川　裕章
从事 IGBT 模块的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部事业统括部产业模块部。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。