第 7 代“X 系列”IGBT-IPM

7th-Generation “X Series” IGBT-IPMs

皆川 启 MINAGAWA, Kei　森 贵浩 MORI, Takahiro　大濑 智文 OSE, Tomofumi

为了对变频器进行进一步小型化、低损耗化和高性能化，开发了第 7 代“X 系列”IGBT-IPM。本产品使用了最新的第 7 代“X 系列”芯片和新控制 IC，与传统产品相比，损耗降低了约 7% 以上，实现了在 150℃下的连续运行。由此，装置的输出电流可增加约 31%。另外，在原有的保护功能的基础上，还内置了温度警示功能，可以避免装置停止动作。并且，在下桥臂的保护动作时，由于制动单元独立动作，可防止半导体器件发生过电压破坏。

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 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，推进了小型化、低损耗化和高可靠性化。IPM（Intelligent Power Module），是具有驱动功能和保护功能的 IGBT 模块。IPM 中内置了业界首创 IGBT 芯片的过热保护功能和警报要素识别功能，为满足高性能化和高可靠性化要求，对电力转换装置的小型化、高效率化和高可靠性化做出了贡献。

此次，为满足变频器进一步小型化、低损耗化、高性能化的要求，新开发了第 7 代“X 系列”IGBT-IPM（X 系列 IPM）。

2 产品概要

图 1 所示为 X 系列 IPM 的外观，**表 1** 所示为产品阵容及产品外形图。为满足市场的小型化要求，X 系列 IPM 新增加了“P639”、“P644”、“P638”三种封装，并根据额定电流开发了八个封装。新封装 P639 通过采用 RC-IGBT（Reverse Conducting-IGBT[1]），与传统封装中最小尺寸的“P629”相比，在冷却器上的设置面积进一步减少了 27%。P644 与传统封装的“P626”外形尺寸相同，该封装使 7 in 1 成为可能。与传统的同一电流容量带封装的“P630”相比，P638 封装使在冷却器上的设置面积减少了 54%。另外，要求高散热性的高额定电流产品采用了高散热绝缘基板。同时，X 系列 IPM 还将适应市场大电流化需求的额定电流产品加入到了产品阵容之中。传统的“V 系列”IGBT-IPM（V 系列 IPM[2]）中，额定电压为 600 V 的产品可达到 400 A，额定电压值为 1200 V 的产品可达到 200 A。X 系列 IPM，额定电压为 650 V 的产品可扩充至 450 A，额定电压为 1200 V 的产品可扩充至 300 A。通过新封装的系列化和现有封装额定电流的扩大，有助于所搭载装置的小型化。

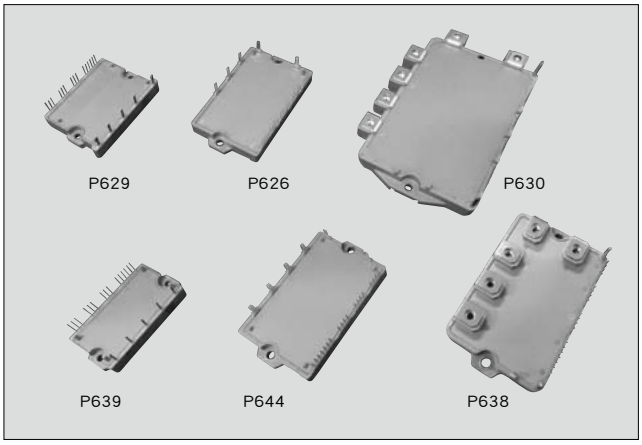


图 1　第 7 代“X 系列”IGBT-IPM（典型封装）

另外，X 系列 IPM 通过第 7 代 IGBT 技术和驱动该技术的控制电路技术，与 V 系列 IPM 相比，损耗降低了约 7% 以上。同时，通过改善第 7 代封装技术和控制电路，将连续工作时的芯片结温 T_{vjop} 范围从 V 系列 IPM 的 125 ℃扩大到了 150 ℃，使高温运行成为可能。通过这些改进，输出电流可增加约 31%。

另一方面，在保护功能方面，具有业界首创的温度警示功能。利用该功能，可将 IGBT 芯片处于过热状态的信息作为警报通知外部。由此，有助于提高性能，如缩短电力转换

表 1 “X 系列”IPM 的产品阵容及产品外形图

(a) 产品阵容

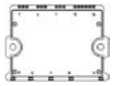
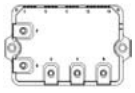
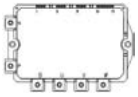
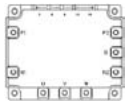
新封装　传统封装　额定电流扩大

额定	元件数量	20 A	30 A	50 A	75 A	100 A	150 A	200 A	250 A	300 A	450 A
600 V	6 in 1	P639									
				P629							
				P626*2							
				P638*2		P638*1*2					
	7 in 1			P644							
	6 in 1 7 in 1			P636*1*2							
				P630*2							
						P630*1*2					
								P631*1*2		P631*1*2	

额定	元件数量	10 A	15 A	25 A	35 A	50 A	75 A	100 A	150 A	200 A	300 A
1200 V	6 in 1	P639									
				P629							
				P626*2							
				P638*2		P638*1*2					
	7 in 1			P644							
	6 in 1 7 in 1			P636*1*2							
				P630*2							
						P630*1*2					
								P631*1*2			

*1：高散热绝缘基板适用产品　　*2：内置温度警示功能的产品（仅 6 in 1）

(b) 产品外形图

封装	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	55.0×90.0×18.5 or 17.0	55.0×90.0×22.0	84.0×128.5×14.0	110.0×142.0×27.0

装置的故障停机时间等。

3 主要功能和特点

3.1 降低损耗的举措

为改善电力转换装置的转换效率，降低 IPM 的损耗非常重要。损耗取决于 IGBT 和 FWD (Free Wheeling Diode) 等半导体芯片的特性和驱动它的控制电路的性能。

图 2 所示为 IGBT 芯片截面结构的比较。与第 6 代 IGBT 相同，第 7 代 IGBT[3] 采用了表面具有微细化的沟槽型栅结构，背面具有电场终止 (FS) 层的薄晶片 IGBT。与第 6 代 IGBT 相比，通过让芯片厚度变薄，改善了导通电压（集电极与发射极饱和电压）和关断损耗。另外，通过优化表面的沟槽型栅结构，增强了提高表面侧载流子浓度的 IE (Injection Enhanced) 效果，改善了导通电压和关断损耗的权衡关系。与标准的 IGBT 模块中搭载的 IGBT 相比，IPM 用 IGBT 表面结构更加优化。该方法是内置了短路保护功能才得以实现的 IPM 特有的改善方法。因此，权衡得到了进一步改善。**图 3** 所示为集电极与发射极饱和电压 $V_{CE(sat)}$ 和关断损耗 E_{off} 的权衡。关断损耗相同时，IPM 用第 7 代 IGBT 导通电压比 IPM 用第 6 代 IGBT 降低了 0.25 V，比模块用第 7 代 IGBT 降低了 0.15 V。但是，因通过表面结构的微细化，降低了导通电压，使电流流动顺畅，所以短路电流增加。因此，通过提高短路保护的速度改善了权衡。

并且，为降低开关时的开通损耗，X 系列 IPM 在 IGBT

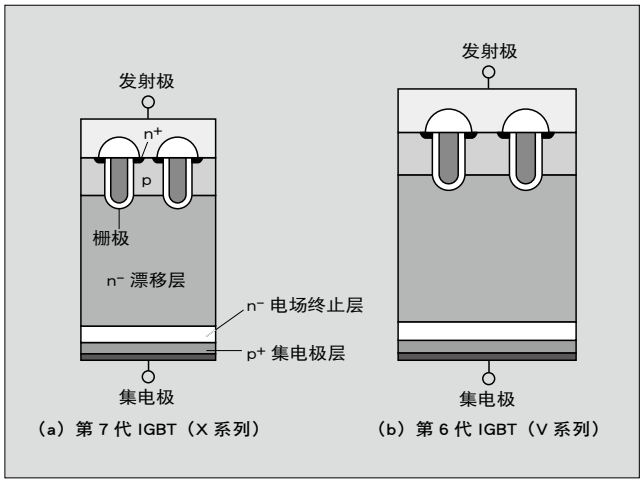


图 2　IGBT 芯片的截面结构

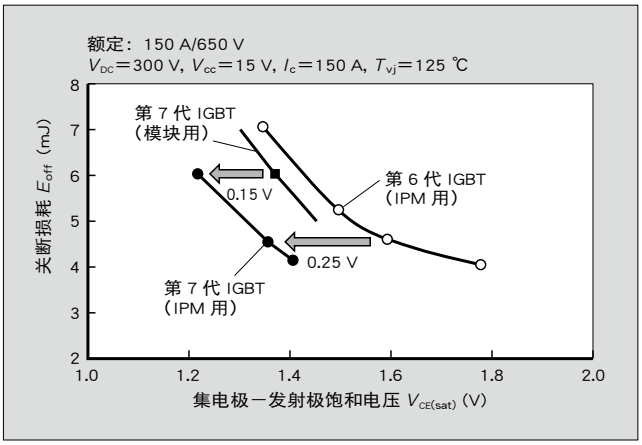


图 3　集电极与发射极饱和电压－关断损耗的权衡

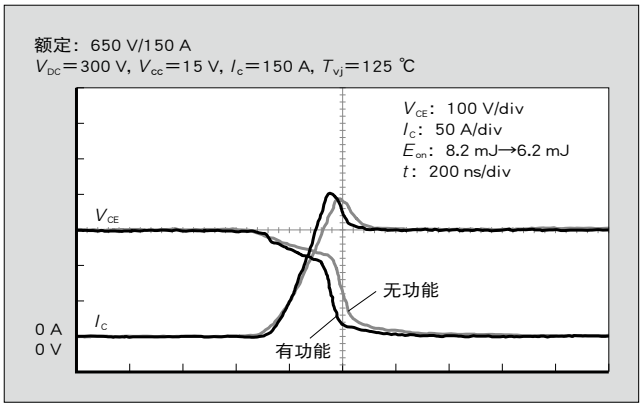


图 4　驱动能力切换功能降低关断损耗的效果

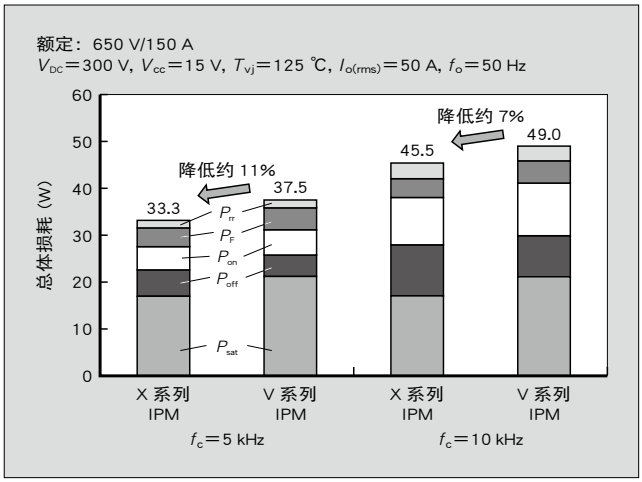


图 5　损耗仿真的比较

驱动电路中搭载了开通驱动能力切换功能。这是一种增加高温时驱动 IGBT 的电流的功能，降低了高温时的开通损耗。另外，通过实时检测 IGBT 芯片的温度，可在最佳时机进行切换。此外，为了不对与开关损耗处于权衡关系的放射干扰产生影响，优化了驱动电流值。**图 4** 所示为 IGBT 驱动电路的驱动能力切换功能对开通损耗的降低效果。通过切换驱动能力，开通损耗降低了约 24%。

图 5 所示为产品额定值为 650 V/150 A 的 PWM 变频器动作时的损耗仿真结果。通过上述特性改善，与 V 系列 IPM 相比，X 系列 IPM 的总损耗在载波频率为 5 kHz 时改善了约 11%，在载波频率为 10 kHz 时改善了约 7%。

3．2　保护功能特性

表 2 所示为 X 系列 IPM 与原有 V 系列 IPM 保护功能的比较。X 系列 IPM 的特点为短路保护功能的高速化与警报输出功能的改善、内置温度警示输出功能、报警时制动部分独立动作。

如 **3．1 节**所述，IGBT 芯片表面结构的微细化可改善 IGBT 的权衡，最大限度地发挥芯片性能。但是，因 IGBT 芯片的短路电流增加，所以有必要在无误检测的前提下进行短路保护的高速化。因此，在快速抑制短路电流的峰值电流的同时，可通过优化断路延迟时间，防止误检测引起的误动作。

表 2　保护功能比较

保护功能	X 系列 IPM	V 系列 IPM
过电流保护	○	○
短路保护	◎ 高速化（1 μs）	○ （3 μs）
芯片过热保护（最低工作温度）	◎ （175 ℃）	○ （150 ℃）
电源电压降低保护	○	○
警报输出	◎ 2 ms, 4 ms, 8 ms 识别范围＝ 1.1 ms 以上	○ 2 ms, 4 ms, 8 ms 识别范围＝ 0.1 ms
温度警示输出	◎ （特定型号）	×
报警时制动单元独立动作	◎	×

○：有功能、×：无功能
◎：与传统 V 系列 IPM 相比的改进要点

另外，关于业界首次搭载的报警原因识别功能，在 X 系列 IPM 中，通过将每个报警原因的识别范围从 0.1 ms 扩大到 1.1 ms 以上，从而提高了报警原因识别功能的识别性。这样，可进行警报输出时的原因分析、原因调查的简易化和迅速化。

此外，作为警报输出的新功能，X 系列 IPM 设置了下桥臂保护动作时制动单元 IGBT 的独立动作。原有的 IPM 如果下桥臂一旦检测到异常并输出警报，则会成为停止下桥臂所有动作的电路逻辑。此时，因制动单元的动作也已停止，所以无法通过制动电路再生旋转的马达中产生的能量，存在 P–N 间电压上升的问题。X 系列 IPM 下桥臂的变频器单元在检测到异常并输出警报时，制动器单元也可以动作，从而解决了上述问题。因此，可抑制电机的功率再生引起的主电源 P–N 间电压的上升，防止半导体器件的过电压破坏。并且，与原来一样，制动单元异常时，也可保护制动单元和其他下桥臂的变频器单元。

3．3　温度警示输出功能（适用于部分机型）

X 系列 IPM 在业界首次搭载了温度警示输出功能。该输出功能监视 IGBT 芯片的温度，一旦达到规定的温度以上，则将芯片过热状态作为警报通知 IPM 的外部。**图 6** 所示为温度警示输出功能的动作波形。芯片的过热保护功能在 IGBT 的芯片温度超过 175 ℃时启动，在输出警报的同时停止开关动作。另一方面，温度警示输出功能在输出温度警示时，可继续 IGBT 的开关动作。具体而言，机床、电梯等装置出现冷却能力不良（散热片堵塞、风扇故障、润滑剂用完等），X 系列 IPM 内部的 IGBT 芯片温度超过 150 ℃时，即向装置端输出温度警示信号。装置接收到该信号后，可通过降低施加于 IPM 的负载电流等方法，使 IGBT 的芯片温度不超过 175 ℃，避免装置的停止动作，继续运行，可在适当的时机进行装置维护。

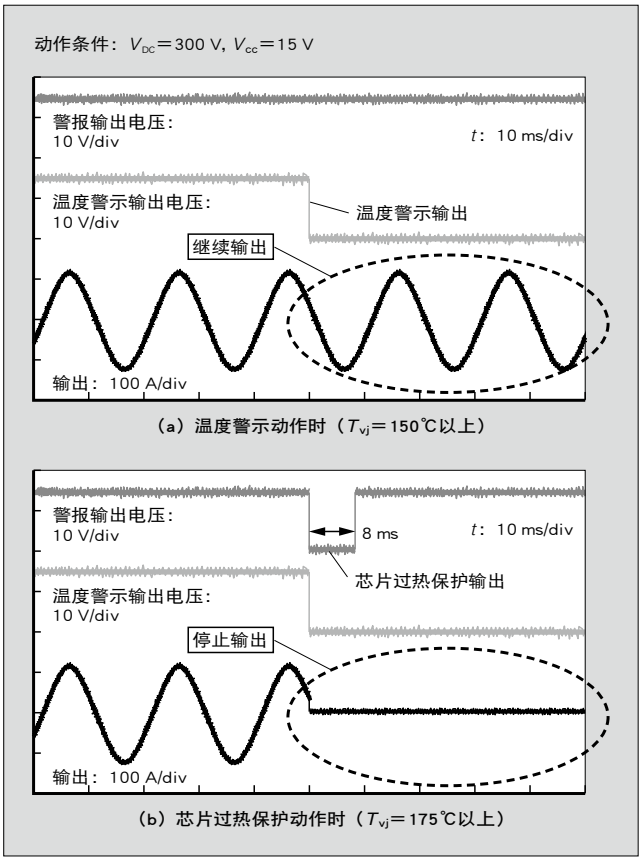


图 6　温度警示输出功能的动作波形

4　高温运行化与降低损耗的效果

表 3 所示为 X 系列 IPM 与 V 系列 IPM 运行温度的对比。X 系列 IPM 连续运行时的 T_{vjop} 从 V 系列 IPM 的 125 ℃扩大到了 150 ℃，最大芯片接合温度 T_{vjmax} 从 V 系列的 150 ℃扩大到了 175 ℃。为实现这样的高温运行，X 系列 IPM 也使用了高耐热凝胶和高可靠性焊锡等技术的第 7 代封装技术。此外，内置于 IPM 的控制 IC 也在考虑到了不易受温度影响的电路方式和高温时的电迁移的基础上进行布局设计，使高温下的运行成为可能。其结果，在电力转换装置中，可应用于比原来更严格的负载条件和低散热设计。

图 7 所示为 IPM 搭载于变频器这一典型电力转换装置时的变频器输出电流与芯片结温的对比。X 系列 IPM 通过扩大连续运行时的 IGBT 芯片结温和降低损耗，与 V 系列 IPM 相比，输出电流可增加约 31 %。

表 3　运行温度比较

项目	X 系列 IPM	V 系列 IPM
最高塑壳温度 T_{cmax}	125 ℃	110 ℃
连续运行时芯片结温 T_{vjop}	150 ℃	125 ℃
最高芯片结温 T_{vjmax}	175 ℃	150 ℃

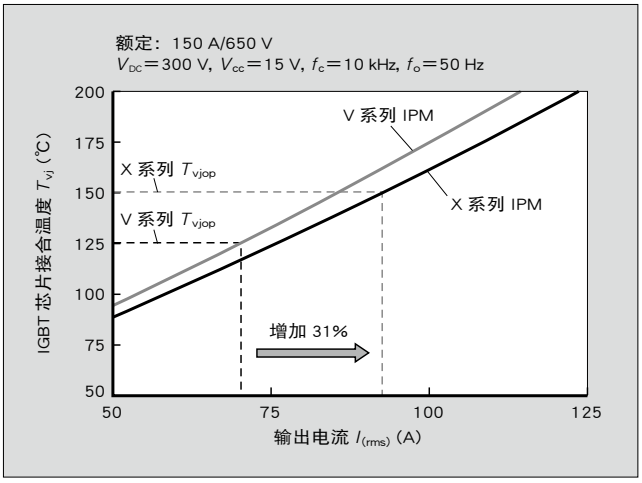


图 7　变频器输出电流与 IGBT 芯片结温

5　后记

以上，对第 7 代“X 系列”IGBT-IPM 进行了论述。本产品在最新一代的 X 系列 IGBT、FWD 以及新控制 IC 开发的基础上，通过采用高散热、高可靠性封装，实现了小型化、低损耗化和高性能化。通过将传统产品替换为第 7 代“X 系列”IGBT-IPM，可实现电力转换装置的高效化、小型化、低成本化，有助于今后电力转换装置的进一步普及，也能为全球能源问题的解决做出重大贡献。

今后，富士电机仍将继续致力于开发满足市场要求的产品。

参考文献

⑴　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.
⑵　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.
⑶　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　　启
从事智能功率模块的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部产业事业部产业模块部。

森　　贵浩

从事产业 IPM 用驱动 IC 的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部元件开发部。

大濑　智文

从事智能功率模块的封装设计。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部封装开发部。

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。