第 2 代小容量 IPM 的系列化

2nd-Generation Small IPM Series

手塚 伸一 TEZUKA, Shinichi　　铃木 启久 SUZUKI, Yoshihisa　　白川 徹 SHIRAKAWA, Toru

面向电动机驱动设备，我们在产品系列中新增了额定电流 20 A 和 30 A 的第 2 代小容量 IPM。IGBT 以第 7 代 IGBT 芯片技术为基础，FWD 对漂移层厚度和寿命控制进行了优化，从而实现了低干扰、低损耗化，并大幅降低了元件的温升。在设想的适用对象，即标准制冷能力为 14 kW 的整体式空调最大负载时的温升仿真中，相比第 1 代小容量 IPM 降低了约 11℃，因此，可扩大设备的允许输出电流。

Fuji Electric has recently added products with current ratings of 20 and 30 A to our 2nd-generation small IPM series to meet the needs of motor drive devices. Applying the 7th-generation IGBT chip technology as a base and optimizing the lifetime control and drift layer thickness of the FWD, we have significantly reduces the temperature rise while lowering noise and loss. We ran a temperature rise simulation of a package air conditioner that has a standard cooling capacity of 14 kW at the maximum load, which are expected to be actual conditions. It showed 11°C lower temperatures than the 1st-generation small IPM. It can therefore expand the allowable output current of the devices.

1 引言

近年来，为防止温室气体排放量增加导致的全球气候变暖，电动机驱动设备也面临着节能化的要求。其中，对于能源消耗比率较大的整体式（业务用）空调，从 2015 年开始适用“高等级马达制度”，被要求必须大幅提升 APF（Annual Performance Factor：全年能源消耗效率），以及实现中间负载领域中的高效化。并且，在应对小型化、结构紧凑化的需求的同时，还要求改善高负载条件下的损耗，以扩大室外机的运行温度范围。

另外，产业用通用变频器和伺服系统的箱体和框架的尺寸不断缩小，而另一方面，为应对输出容量的扩大，将这些系统高效化的要求不断提高。

富士电机为应对这些要求，面向变频器式小容量电动机驱动设备，以小型、低损耗、低干扰为特征，实现了内置三相逆变桥电路、控制电路和保护电路的小容量 IPM（Intelligent Power Module）[1],[2] 的产品化。

此次，为进一步提升整体式空调、通用变频器、伺服系统等电动机驱动设备的节能性能，富士电机使用第 7 代 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）芯片技术[3]，在产品系列中新增了额定电流 20 A 和 30 A 的第 2 代小容量 IPM[4]。

2 产品概要

图 1 中展示了本次开发的第 2 代小容量 IPM 的外观，**表 1** 中展示了产品阵容和主要特性。

产品的外形尺寸为 43×26×3.7（mm），采用与现已量产的 10 A、15 A 产品相同的小型封装，为变频器基板的小型化做出了贡献。

与 10 A、15 A 产品的温度保护功能相同，有仅带连续温度输出的功能，和兼具连续温度输出和过热保护的功能 2 种。

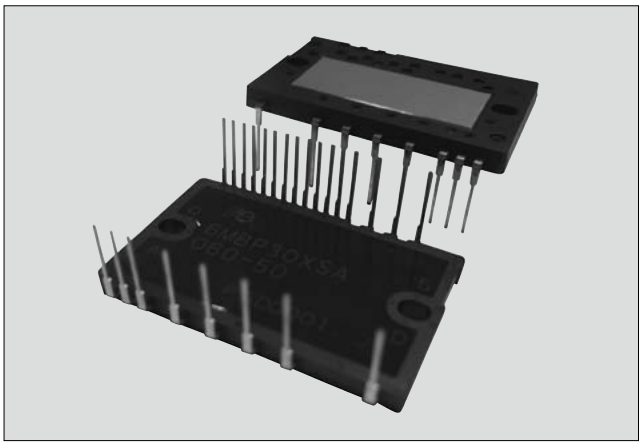

图 1　第 2 代小容量 IPM

表 1　产品阵容和主要特性

型号名	V_{CE}	I_C	$V_{CE\ (sat)}$ (typ.)	V_F (typ.)	温度保护功能
6MBP20XSA060-50	600 V	20 A	1.45 V	1.50 V	连续温度输出
6MBP20XSC060-50					连续温度输出＋过热保护
6MBP30XSA060-50		30 A	1.45 V	1.55 V	连续温度输出
6MBP30XSC060-50					连续温度输出＋过热保护

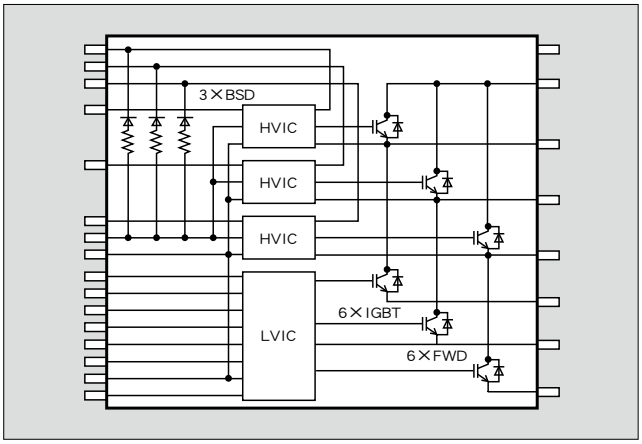

图 2　内部等效电路

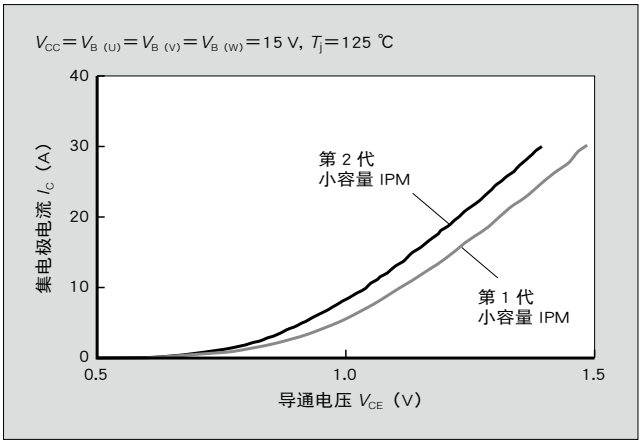

图 3　IGBT 的导通电压和集电极电流的特性

此次开发的 20 A 和 30 A 的产品，是可适用于 8～14 kW 的整体式空调的压缩机驱动，以及 1.0～2.2 kW 输出的通用变频器和 0.4～1.0 kW 输出的伺服放大器等产品。

图 2 中展示了内部等效电路。与 10 A、15 A 的产品一样，在铝绝缘基板上安装了以适用了第 7 代 IGBT 芯片技术的低损耗 IGBT 和高速 FWD（Free Wheeling Diode）构成的三相逆变桥电路。并在引线框架上，直接安装了一个驱动该三相逆变桥电路上的低压侧 IGBT 的 LVIC（Low Voltage Integrated Circuit），和三个驱动高压侧 IGBT 的 HVIC（High Voltage Integrated Circuit）。

另外，通过搭载内置了限流电阻的 BSD（Boot-Strap-Diode），能够以较少的部件数量构成高压侧驱动电路的电源。

第 2 代小容量 IPM 通过采用低损耗元件，以及将运行保证温度 $T_{j\,(ope)}$ 从 125 ℃扩大到 150 ℃，在第 1 代小容量 IPM 的基础上，进一步扩大了变频器电路的允许输出电流，提升了设计的自由度。

3　设计

3.1　元件设计

随着电流容量的扩大，开关运行时发生的干扰的增加令人担忧，因此，我们实施了低干扰化的设计，改善了开关损耗和干扰的均衡关系。

⑴　降低导通损耗

IGBT 以第 7 代 IGBT 芯片技术为基础，通过沟槽栅镶边网格尺寸的配置和栅极阈值电压的优化，成功降低了导通损耗。

图 3 中展示了 IGBT 的导通电压和集电极电流的特性。30 A 产品的额定电流下，导通电压比第 1 代小容量 IPM 降低了约 8%，另外，对空调用途中非常重要的 APF 有显著影响的低电流领域的导通电压降低了约 7%。

⑵　降低关断损耗

为降低关断损耗，只要提高开关速度即可，但 dv/dt 会急剧变动，因此，产生的干扰可能增加。

第 2 代小容量 IPM 中，d*v*/d*t* 被抑制到与过去的第 1 代小容量 IPM 相同的级别，并抑制了 IGBT 关断时产生的尾电流，改善了干扰和关断损耗的均衡关系。为抑制尾电流，我们对 IGBT 漂移层的厚度、电场终止层以及背面 pn 接合的载流子注入量进行了优化。

图 4 中展示了通过 IGBT 关断波形的频率分析，得到的电压干扰级别和关断损耗的均衡特性。额定电流 30 A 时，电压干扰级别与第 1 代小容量 IPM 相同，而关断损耗实现了约 50% 的大幅降低。

⑶　降低开通损耗

图 5 中展示了恢复时的开关波形。假如使用第 1 代小容量 IPM 的 FWD，提高开关速度、降低开关损耗时，跳变电压将增加，产生的干扰会变大。为了抑制产生的干扰，同时降低开通损耗，必须降低恢复电流，抑制跳变电压。

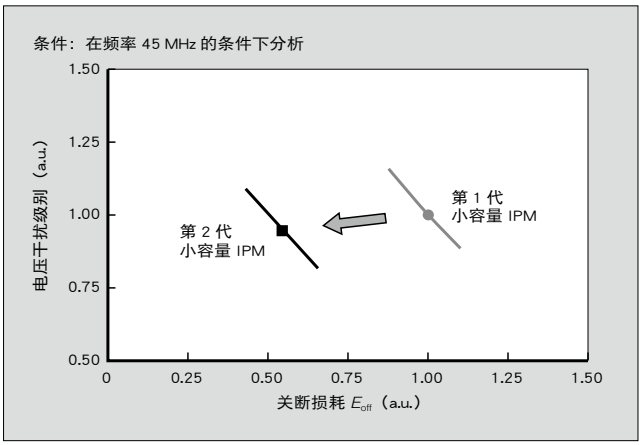

图 4　IGBT 的电压干扰级别和关断损耗的均衡特性

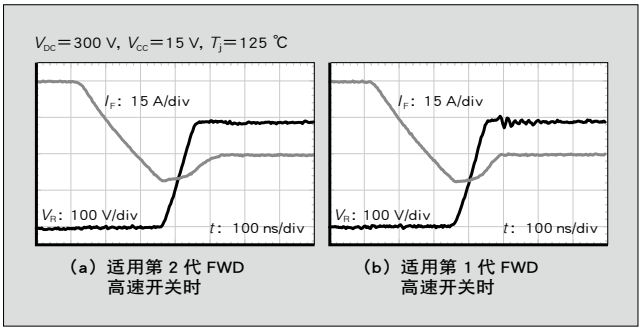

图 5　恢复时的开关波形

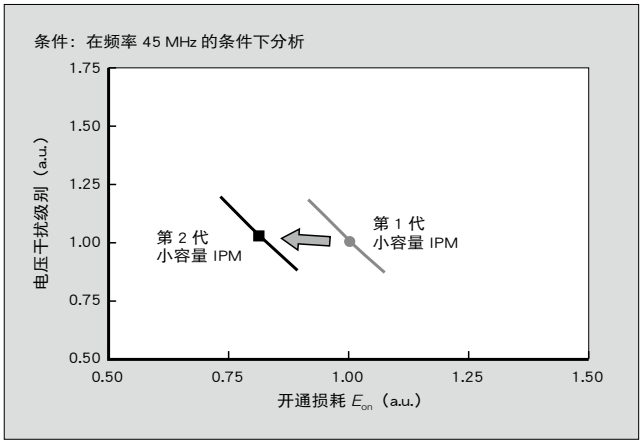

图 6　FWD 的电压干扰级别和开通损耗的均衡特性

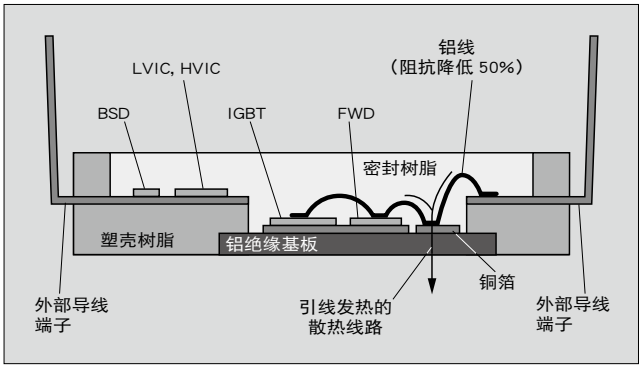

图 8　封装的截面结构

图 6 中展示了 FWD 恢复时的电压干扰级别和开通损耗的均衡特性。此次的产品对 FWD 的漂移层厚度和寿命控制进行了优化，在额定电流 30 A 时，实现了和第 1 代小容量 IPM 相同的电压干扰级别，并降低了约 20% 的开通损耗。

3．2　控制电路的设计

LVIC 的过热保护功能在保护 LVIC 的结温 $T_{j\,(LVIC)}$ 不超过运行保证值的同时，还必须保证不会因为 IGBT 连续运行时的温升，导致过热保护启动。

如**图 7** 所示，第 2 代小容量 IPM 中，LVIC 的结温 Tj（LVIC）的运行温度范围上限为 150 ℃。而 IGBT 若达到运行保证温度 $T_{j\,(ope)}$ 的上限 150 ℃，则相邻的 LVIC 的温度会上升到 136 ℃，因此，必须保证在这一温度以下过热保护不会启动。因此，我们抑制了 LVIC 结温检测结果的偏差，将过热保护范围设定为 143 ℃ ±7 ℃。另一方面，第 1 代小容量 IPM 中，LVIC 的结温 $T_{j\,(LVIC)}$ 的运行温度范围上限为 135 ℃。若达到 IGBT 的运行保证温度 $T_{j\,(ope)}$ 的上限 125 ℃，则相邻的 LVIC 的温度会上升到 115 ℃。因此，过热保护范围为 125 ℃ ±10 ℃。因此，第 2 代小容量 IPM 不仅扩大了 LVIC 的运行温度范围，还为了使检测范围在 ±7 ℃以下，通过 IC 内部的标准电源电路等的高精度化，将 IGBT 的运行保证温度 $T_{j\,(ope)}$ 在第 1 代小容量 IPM 的基础上扩大了 25 ℃，达到了 150 ℃，从而使允许输出电流的扩大成为可能。另外，LVIC 中内置的连续温度输出功能的特性值与第 1 代小容量 IPM 具有兼容性，可与客户设计的保护电路通用。

3．3　封装的设计

第 2 代小容量 IPM 采用了通过焊接直接接合到整体式空调、通用变频器等的印刷基板上的封装结构。若印刷基板的输出电流增加，则外部导线端子的温度会上升，焊接部的温度也会上升。而为确保焊接部的可靠性，必须将运行时的焊接部的温度维持在 90～100 ℃以下。为此，必须限制输出电流。

图 8 中展示了封装的截面结构。我们采用了与先行产品化的 10 A 和 15 A 产品相同的、在铝绝缘基板侧对引线产生的焦耳热散热的结构，同时，此次为抑制伴随电流容量扩大而出现的外部导线端子的温升，使引线的阻抗比过去下降了 50%，降低了焦耳热。

4　适用效果

下面将展示在整体式空调和伺服放大器中适用额定 600 V/30 A 产品的效果。

图 9 中展示了设想标准的 14 kW 整体式空调，对最大负载时的温升进行仿真后的结果。

第 2 代小容量 IPM 最大负载时的温升凭借上述的损耗降低效果，比第 1 代小容量 IPM 降低了约 11 ℃。并且，

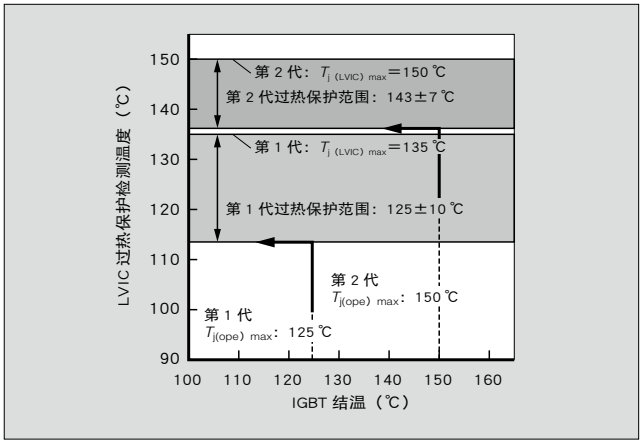

图 7　LVIC 过热保护检测温度和 IGBT 结温

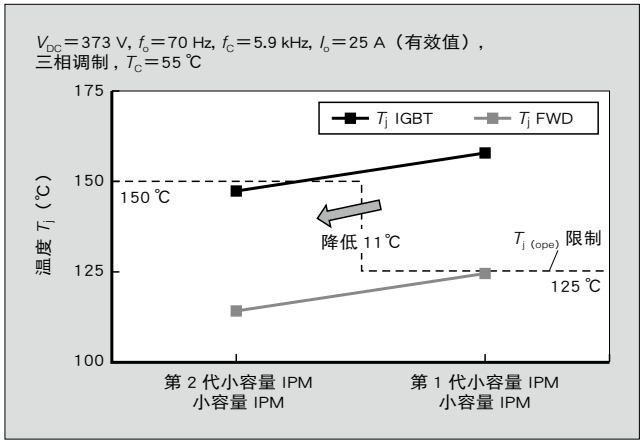

图 9　整体式空调最大负载时的温升仿真结果

第 2 代小容量 IPM 通过将运行保证温度 $T_{j\,(ope)}$ 从第 1 代小容量 IPM 的 125 ℃扩大到 150 ℃，保证了可在运行保证温度 $T_{j\,(ope)}$ 的保证值以下运行。从而可适用于第 1 代小容量 IPM 难以适用、输出容量需要具有更高级别额定电流的 IPM 的空调中。

图 10 中展示了 1.0 kW 输出的伺服放大器加速、减速运行时的温升仿真的结果，**图 11** 中展示了电动机锁定运行时的温升仿真的结果。

第 2 代小容量 IPM 在加速、减速运行和电动机锁定运行时的温升，与第 1 代小容量 IPM 呈现几乎相同的数值。但第 2 代小容量 IPM 通过将运行保证温度 $T_{j\,(ope)}$ 从第 1 代小容量 IPM 的 125 ℃扩大到 150 ℃，保证了可在运行保证温度 $T_{j\,(ope)}$ 的保证值以下运行。从而可适用于第 1 代小容量 IPM 难以适用、输出容量需要具有更高级别额定电流的 IPM 的伺服放大器中。

图 12 中展示了搭载 600 V/30 A 产品的整体式空调以 PWM（Pulse Width Modulation）进行稳定运行时，印刷基板焊接部温度的测定结果。第 2 代小容量 IPM 凭借元件的低损耗化和封装外部导线端子部温升的抑制效果，使得焊接部的温度相比第 1 代小容量 IPM 降低了约 14 ℃。最终，由于可抑制焊接部的温升，允许输出电流可扩大约 19%。

图 13 中展示了适用于 0.75 kW 输出的伺服放大器中时，传导干扰的评估结果。这一结果在 EN61800-3 C2 类的限度值（QP 值）以下，结合上述的温升抑制效果，实现了低干扰的特性。

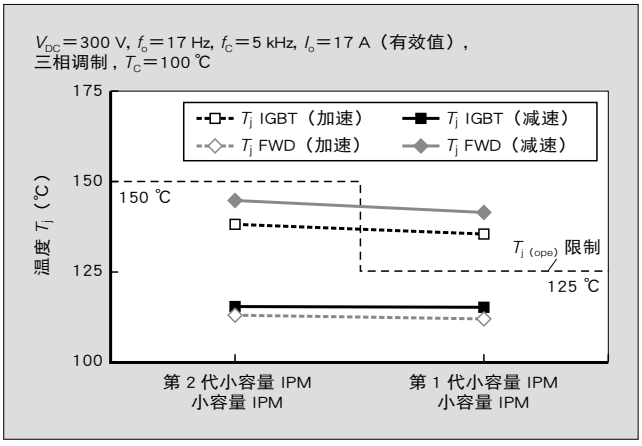

图 10　伺服放大器加速、减速运行时的温升仿真结果

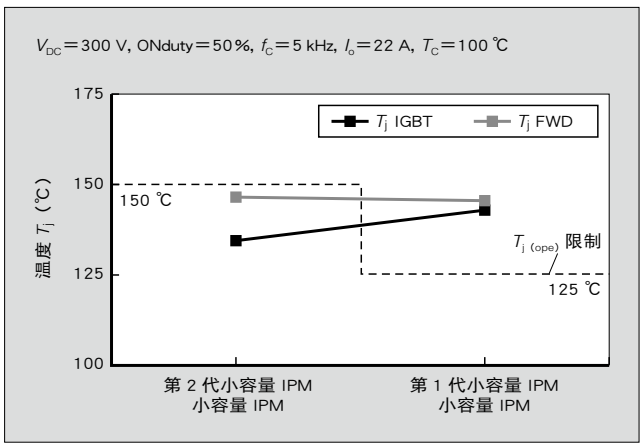

图 11　伺服放大器电动机锁定运行时的温升仿真结果

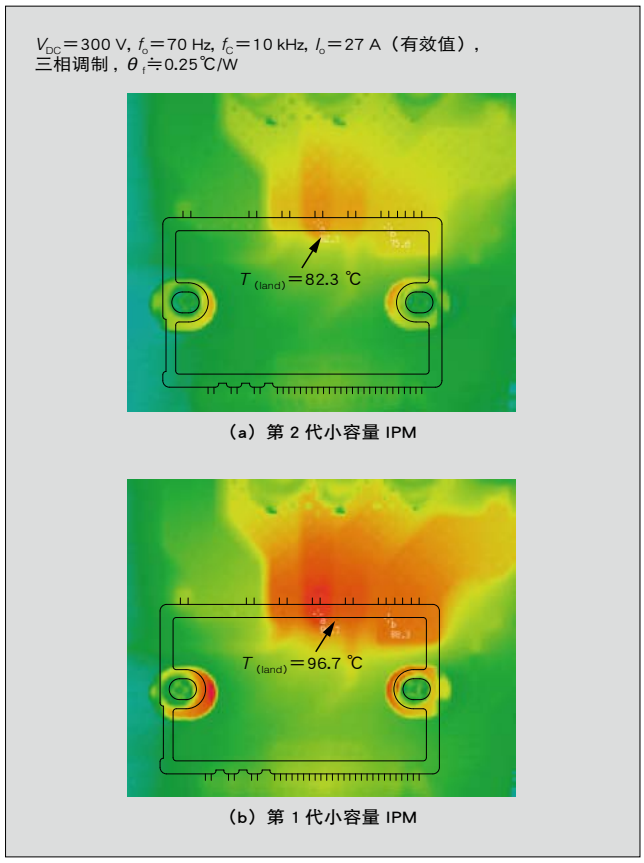

图 12　整体式空调 PWM 运行时焊接部温度的测定结果

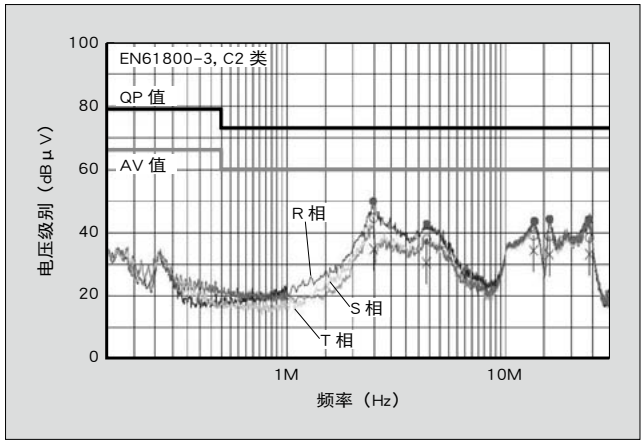

图 13　伺服放大器传导干扰评估结果

5　后记

本稿对作为第 2 代小容量 IPM 系列推出的、扩大了电流容量的 20 A 和 30 A 产品进行了介绍。本产品和已经开始量产的 10 A 和 15 A 产品一样，以第 7 代 IGBT 芯片技术为基础，通过采用优化后的低干扰、低损耗元件，可实现变频控制的电动机驱动设备的节能化。

今后，富士电机也将继续开发能为电动机驱动设备节能性能的提升做贡献的产品。

参考文献

⑴ Yamada, T. et al. “Novel Small Intelligent Power Module For RAC”, proc. 2012 PCIM Asia.

⑵ 山田忠則ほか . インバータエアコン用小容量 IPM. 富士電機技報 . 2012, vol.85, no.6, p.430-434.

⑶ T. Heinzel. et al. “The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”, Proceeding of PCIM Europe 2015, p.359-367.

⑷ 荒木龙等. 第 2 代小容量 IPM. 富士电机技报. 2016, vol. C8, no.1, p.20-23.

手塚　伸一

从事分立器件功率元件、小容量 IPM 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分立器件・IC 技术部。

铃木　启久

从事分立器件功率元件和小容量 IPM 用 FWD 芯片的设计和开发。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。

白川　　徹

从事分立器件功率元件和小容量 IPM 用 IGBT 芯片的设计和开发。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。

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。