# 采用小型封装“P644”的第 7 代“X 系列”IGBT-IPM

## 7th-Generation “X Series” IGBT-IPM with “P644” Compact Package

寺岛　健史 TERASHIMA, Kenshi　　及木　达矢 OYOBIKI, Tatsuya　　大濑　智文 OSE, Tomofumi

为满足电力转换装置进一步小型化、高效化、高输出化的要求，富士电机开发了采用业界最小级别的“P644”封装作为内置制动电路 IPM 的 IGBT-IPM。该产品属于应用了第 7 代芯片技术和封装技术的“X 系列”IPM 产品系列。与传统产品“V 系列”IPM“P636”相比，连续工作时的功率损耗减少了约 17%，可在 150 ℃高温下工作。因此，模块设置面积可缩小约 12%，变频器输出电流可增加约 26%。

Fuji Electric has developed a new IGBT-IPM to meet the requirements of the further miniaturization, high efficiency, and high power of conversion systems by using the “P644” package, which is the smallest in the industry for IPMs equipped with a brake circuit. This IPM is included in our line-up of the “X Series” IPMs, which uses a 7th-generation chip and packaging technologies. The new X Series IPM has lower power dissipation than the conventional “V Series” IPMs using “P636” by approximately 17% and can operate in high-temperatures up to 150°C. These enhancements can reduce the module footprint by approximately 12% and increase inverter output current by approximately 26%.



## 1　引言

全球变暖和能源问题是近年来人类面对的重要课题。为解决这一课题，在有效利用能源，为节能化做出贡献的电力电子电力转换装置中，作为关键器件的功率半导体的技术开发不可或缺。

通过 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 模块的产品化，富士电机为电力转换装置的小型化、高效化和高输出化做出了贡献。IGBT IPM (Intelligent Power Module) 是在由 IGBT 和 FWD (Free Wheeling Diode) 构成的普通 IGBT 模块中，内置了 IGBT 栅极驱动电路和保护电路等的高性能 IGBT 模块[1]。为实现顾客要求的低损耗化，该栅极驱动电路进行了优化设计，可改善开关损耗和放射干扰的均衡特性。除了改进搭载于 IPM 中的 IGBT 和 FWD 之外，还通过栅极驱动电路带来的低损耗化来抑制工作时的温升，使 IGBT-IPM 小型化。

为了满足电力转换装置进一步小型化、高效化、高输出化的要求，开发了采用最小级别“P644”封装作为内置制动电路 IGBT-IPM 的第 7 代 IGBT-IPM (X 系列 IPM)。

本稿将对产品特点及其对电力转换装置的效果进行介绍。

## 2　产品概要

**图 1** 所示为新型小型封装 X 系列 IPM“P644”(X-P644) 的外观，**图 2** 所示为电路框图。P644 封装的外观尺寸为 W87.0×D50.2×H12.0 (mm)。7 in 1 的电路结构将三相变频器电路和制动电路集成在一个模块中。通过搭载制动电路，无需外置制动电路，有助于电力转换装置的小型化和省空间化。

**表 1** 所示为产品阵容。在 X-P644 的产品阵容中，额定电压 650 V 系列为 50 A 和 75 A，额定电压 1200 V 系列为 25 A 和 35 A。与相同额定值的传统 V 系列 IPM“P636”相比，X-P644 实现了小型化，冷却器上的模块设置面积缩小了 12%。

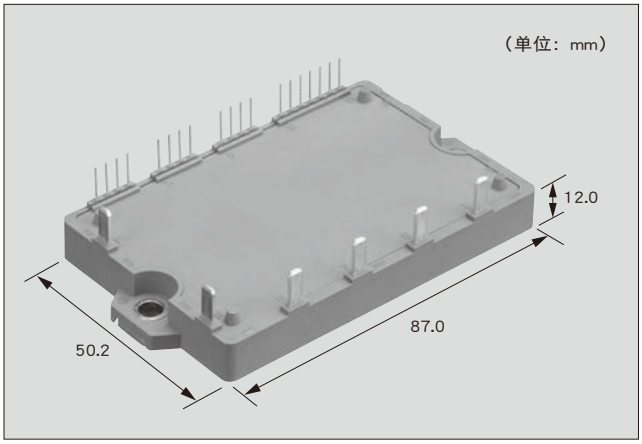


**图 1　X 系列 IPM“P644”的产品外观**

通过采用第 7 代芯片技术的 IGBT 芯片降低损耗，改善栅极驱动电路，与传统的 V 系列 IPM 相比，同时实现了低损耗化和小型化。并且，将连续工作时的介面温度 $T_{vjop}$ 的最高温度从 V 系列 IPM 的 125 ℃扩大到了 150 ℃，使高温工作成为可能。

在 X 系列 IPM 的警报输出中，使下桥臂〈注 1〉保护动作时的制动单元 IGBT 可独立运作。传统的 V 系列 IPM 中，一旦下桥臂检测到异常并输出警报，逻辑电路会停止包括制动单元动作在内的所有下桥臂运作。因此，如果下桥臂检测到异常，则电机的旋转能量无法通过制动电路再生，P-N 间电压上升，存在有时半导体元件会发生过电压破坏的问题。为解决这一问题，在 X 系列 IPM 中，即使下桥臂检测到异常

〈注 1〉上桥臂和下桥臂：参考 54 页“解说 1”

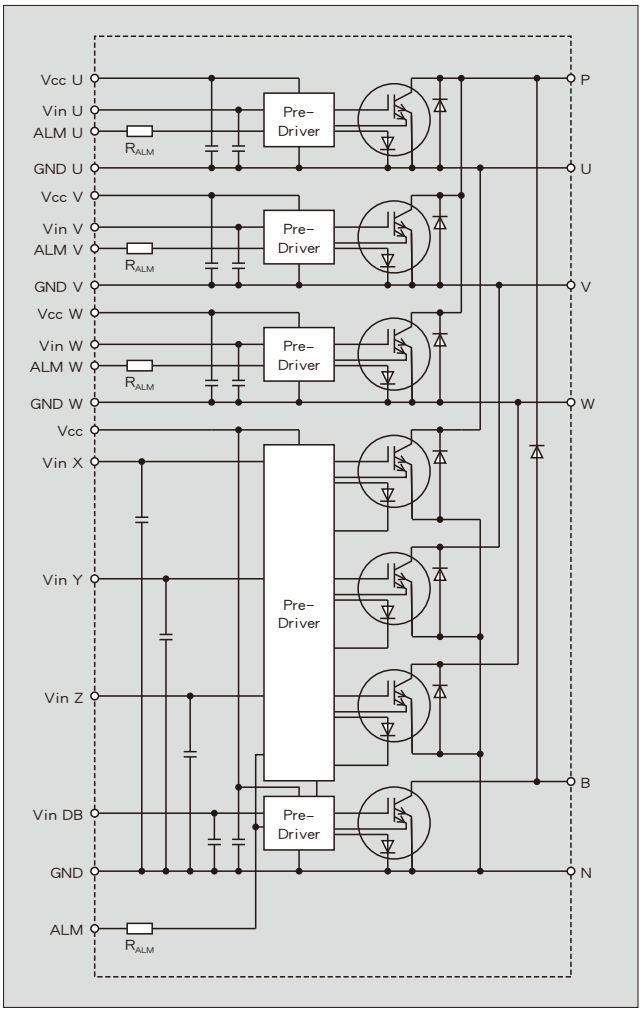


图 2　电路框图

表 1　产品阵容

| 额定电压 | 额定电流 | | 产品型号 | 内置功能 |
|---|---|---|---|---|
| | INV | DB | | |
| 650 V | 50 A | 30 A | 7MBP50XJA065-50 | ○ IGBT 驱动电路<br>○过电流保护<br>○控制电源电压降低保护<br>○芯片加热保护<br>○警报输出（上下警报） |
| | 75 A | 50 A | 7MBP75XJA065-50 | |
| 1200 V | 25 A | 15 A | 7MBP25XJA120-50 | |
| | 35 A | 25 A | 7MBP35XJA120-50 | |

并输出警报，制动单元也可独立动作。这样，抑制了来自电机的电力再生导致的主电源 P-N 间电压的上升。并且，在制动单元异常的情况下，与传统产品一样[1]，在保护制动单元的同时也保护了其他的下桥臂的变频器单元。

## 3　小型化与降低损耗

### 3.1　关断特性的改善

在兼顾基于 P644 封装的小型化和 IGBT-IPM 的高输出化的基础上，伴随着电力密度的上升，存在封装内部的热集中和热干扰导致的芯片温度上升问题。为解决这一问题，降低 IGBT-IPM 损耗非常重要。

第 7 代 IGBT 通过表面沟槽型栅结构的微细化和利用薄晶片加工技术使漂移层变薄，改善了集电极和发射极饱和电压和关断损耗的均衡特性[2],[3]。

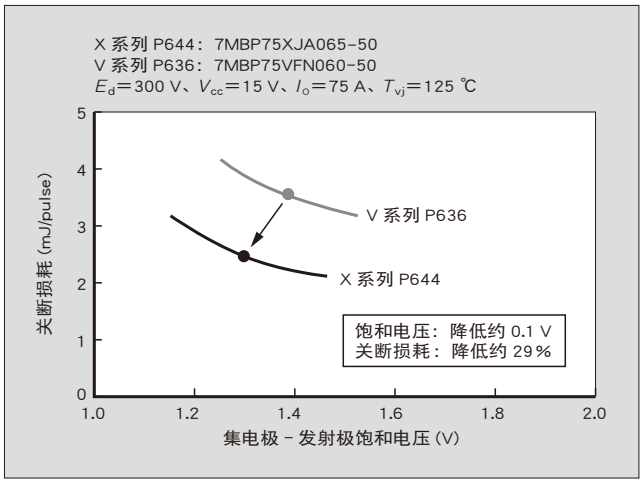


图 3　第 7 代 IGBT 的均衡特性

**图 3** 所示为 X-P644 和传统产品 V 系列 IPM “P636”（V-P636）的饱和电压与关断损耗的均衡特性。与 V-P636 相比，X-P644 的饱和电压降低了约 0.1 V，关断损耗降低了约 29%。因此，与 V-P636 相比，X-P644 在连续工作时将占**图 7** 所示 IGBT-IPM 功率损耗约 60% 的稳态损耗 $P_{sat}$ 与关断损耗的合计值降低了约 19%。

另外，通过优化背面结构的电场终止（FS）层，抑制了基于薄晶片化的元件耐压下降和关断时的电压变动。

### 3.2　开通特性的改善

为了降低 IGBT-IPM 损耗，除了改善上述 IGBT 的均衡特性外，还改善了约占功率损耗 20% 的 IGBT 的开通损耗。如**图 4** 所示，与 V-P636 相比，X-P644 的开通损耗降低了约 13%。

在 X 系列 IPM 中，为了降低开关时的开通损耗，新搭载了根据 IGBT 芯片的接合温度最佳地控制 IGBT 开通时栅极驱动能力的功能。通常，IGBT 的温度越高，电压变化 d$v$/d$t$ 和电流变化 d$i$/d$t$ 越小，开关越慢，因此损耗增加。X 系列 IPM 通过使用内置于 IGBT 中的温度传感器实时监

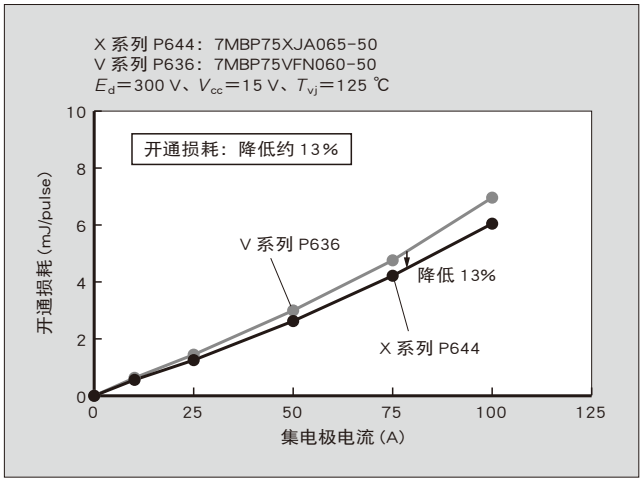


图 4　开通损耗的比较

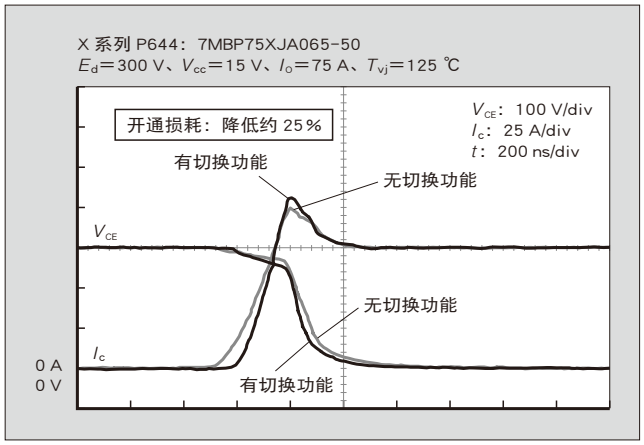


图 5　基于开通驱动能力切换功能的开通损耗的改善效果

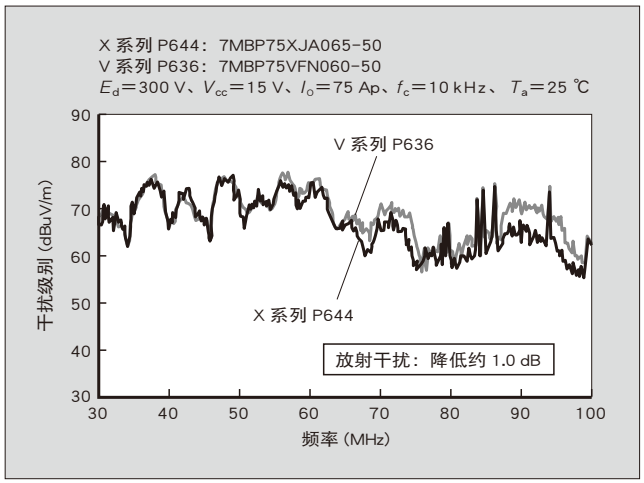


图 6　放射干扰的比较（相对比较试验结果）

视 IGBT 温度，进行开通驱动能力的切换控制，从而避免开关时的电压变化 d$v$/d$t$ 和电流变化 d$i$/d$t$ 因温度上升而变小[(1)]。如**图 5** 所示，通过使用本功能，可将额定电流下的开通损耗降低约 25%。

另外，如果为了降低开关损耗而增大开关特性 d$v$/d$t$ 和 d$i$/d$t$，则放射干扰会变大。即，开关损耗与放射干扰之间存在权衡关系。为了使 d$v$/d$t$ 和 d$i$/d$t$ 与传统的 V 系列 IPM 相同，X 系列 IPM 优化了开通驱动能力切换功能，在抑制放射干扰的同时，降低了开关损耗。如**图 6** 所示，在相同的额定值产品（650 V/75 A）中，X-P644 的放射干扰与 V-P636 处于同等的水平。

### 3. 3　损耗

**图 7** 所示为相同额定值产品（650 V/75 A）的 PWM 变频器工作时损耗的仿真结果。因上述特性改善，与 V-P636 相比，X-P644 的总损耗在连续工作时降低了约 17%，在电机锁定[〈注 2〉]工作时降低了 8%（$f_c$=10 kHz）。

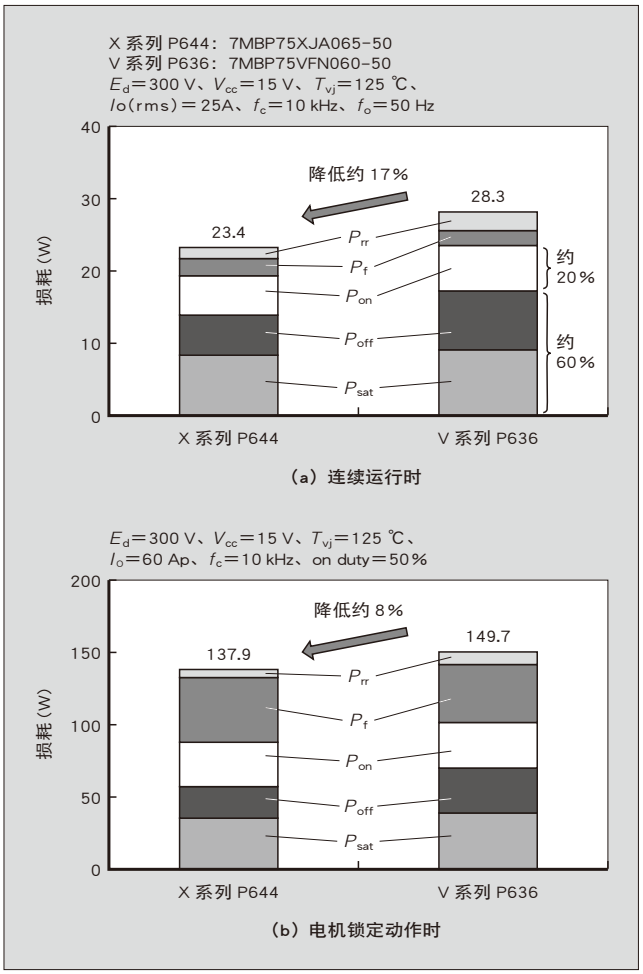


图 7　损耗仿真的比较

表 2　最高运行温度的比较

| 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 ℃ |
| 最高芯片接合温度 $T_{vj\ max}$ | 175 ℃ | 150 ℃ |

## 4　高温工作化

**表 2** 所示为 X-P644 与 V-P636 的最高运行温度的比较。X-P644 通过采用第 7 代封装技术——高耐热凝胶和高可靠性焊锡等可进行高温工作的技术，将连续工作时的介面温度 $T_{vjop}$ 从 V 系列 IPM 的 125 ℃扩大到了 150 ℃，将最高介面温度 $T_{vj\ max}$ 从 V 系列 IPM 的 150 ℃扩大到了 175 ℃[(1)-(3)]。

## 5　采用低价格基板

传统产品 V-P636 通过采用作为高导热性绝缘基板的 AlN（氮化铝）材料进行低热阻化，改善了热集中导致的

〈注 2〉电机锁定：指电机在可控制状态下保持位置的状态。即使从外部施加外力时停止的位置发生偏移，也可通过控制使其返回停止位置。

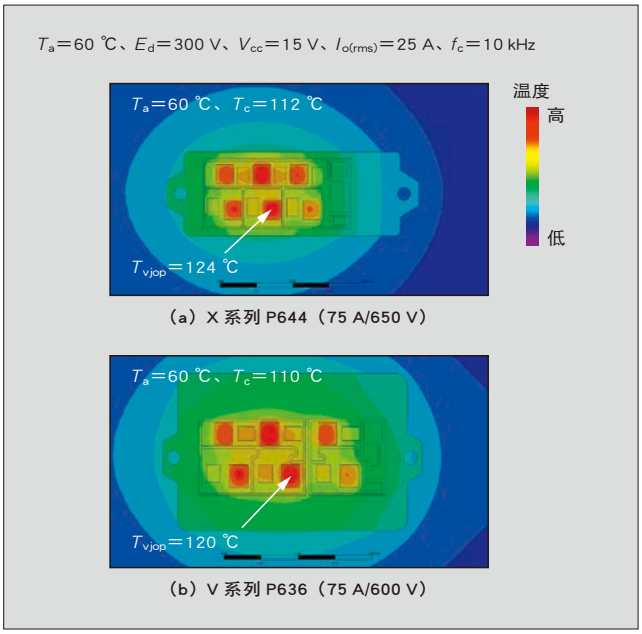


图 8　连续工作时的温度分布比较（瞬态传热分析结果）

温升问题。另一方面，因 X-P644 可进行芯片的高温工作，运行温度范围得到扩大。此外，因降低了损耗，采用了比 AlN 材料更便宜且普遍广泛使用的 $Al_2O_3$（氧化铝）材料作为绝缘基板，实现了低价格化。

为确认 X-P644 的绝缘基板的变更和小型化封装内部的热集中和热干扰引起的温升，利用 FEM（有限元法：Finite Element Method）进行了瞬态传热分析。**图 8** 所示为在与 V-P636 相同的连续工作条件下使 X-P644 工作时温度分布的比较。相对于连续工作时的接合温度上限值 $T_{vjop}$=125 ℃，V-P636 余量仅为 5 ℃，而相对于接合温度上限值 $T_{vjop}$=150 ℃，X-P644 可确保 26 ℃的余量。因此，证明 $Al_2O_3$ 材料绝缘基板完全适用。

## 6　小型化与高输出化

如**图 9** 所示，相对于 V-P636，X-P644 可增加约 26% 的输出电流。

另外，**图 10** 是在**图 8** 连续工作状态下进行电机锁定时温度分布的比较。在与 V-P636 相同条件下进行锁定时，X-P644 因小型化，介面温度会高至 $T_{vj}$=172 ℃，但因比最高介面温度 $T_{vj\ max}$=175 ℃低，所以可在与传统产品

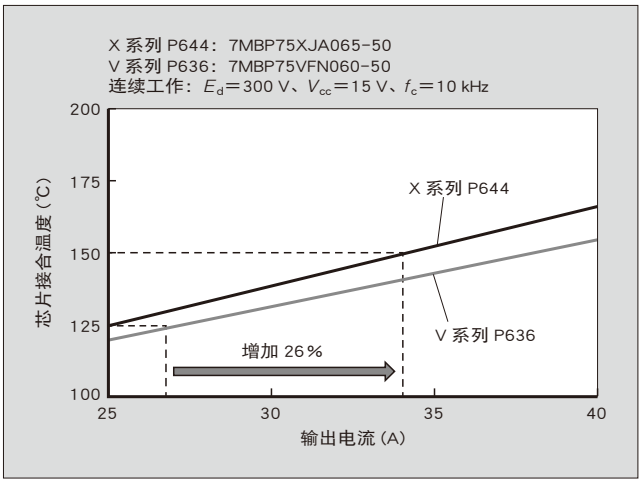


图 9　电力转换装置的输出电流与接合温度

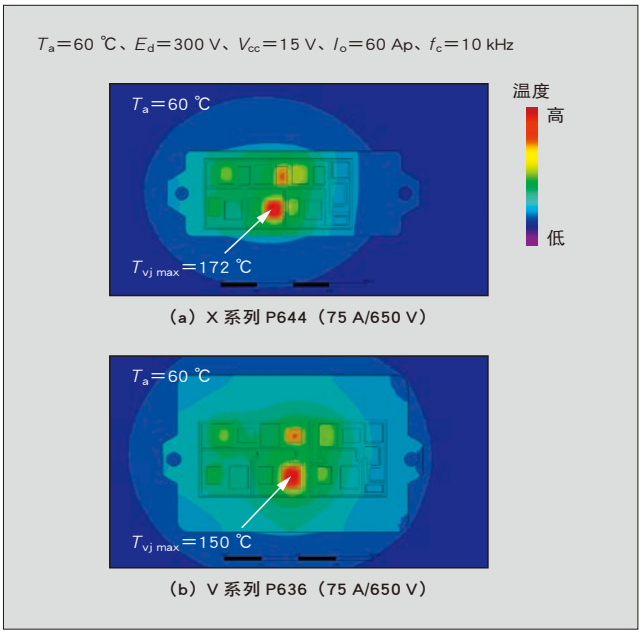


图 10　电机锁定动作时的温度分布比较（瞬态传热分析结果）

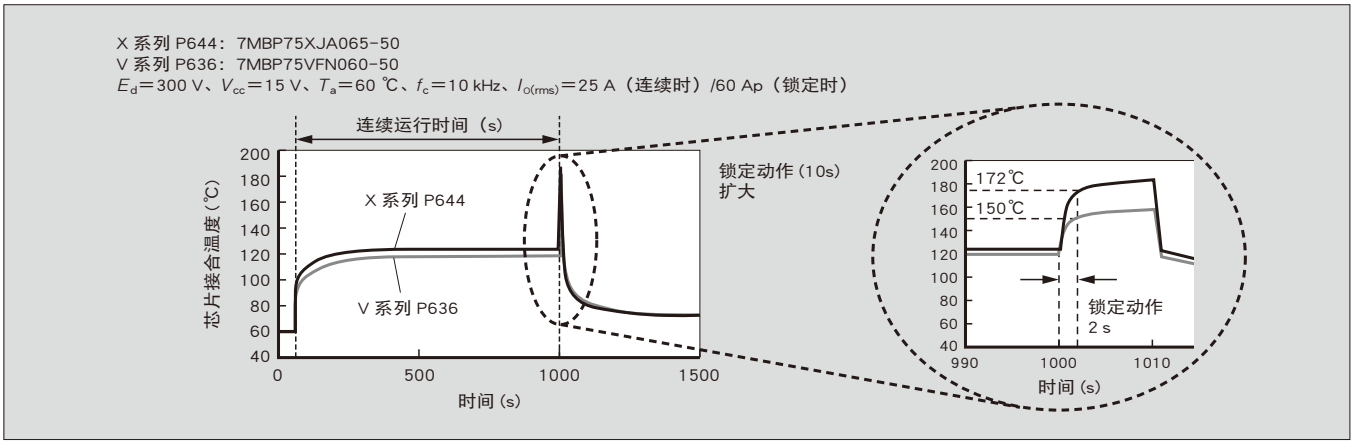


图 11　介面温度上升的比较（瞬态传热分析结果）

相同的条件下使用。**图 11** 所示为上述一系列动作中介面温度变化的比较结果。从以上结果可知，从 V-P636 置换为 X-P644，不仅可将电力转换装置的模块安装面积缩小约 12%，还可以获得更高的输出功率。

## 7 后记

以上，对采用小型封装“P644”的第 7 代“X 系列”IGBT-IPM 进行了介绍。

作为内置制动电路 7 in 1 的 IGBT-IPM，业界最小级别的“P644”新加入到产品阵容中，可实现今后电力转换装置的进一步小型化和低成本化，可广泛地为社会做出贡献。

今后，富士电机仍将进一步推进技术革新，通过 IGBT 模块的产品开发，为全球性能源与环境问题的解决做出贡献。

**参考文献**

⑴ 皆川启等. 第 7 代“X 系列”IGBT-IPM. 富士电机技术期刊. 2020, vol.C12, no.1, p.12-16.

⑵ 川畑润也等. 第 7 代“X 系列”IGBT 模块. 富士电机技术期刊. 2016, vol.C8, no.1, p.15-19.

⑶ Kawabata, J. et al. “The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”. Proceeding of PCIM Europe 2015.

**寺岛　健史**

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。

**及木　达矢**

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。

**大濑　智文**

从事功率模块的封装设计。现就职于富士电机深圳有限公司开发室功率半导体开发部。

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。