现状与展望

功率半导体的现状与展望

Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook

藤平 龙彦 FUJIHIRA, Tatsuhiko　宫坂 忠志 MIYASAKA, Tadashi　井川 修 IKAWA, Osamu

1 引言

随着人口与经济的增长，全球的能源消耗量日益增长。为了控制 CO_2 的排放量，防止地球变暖，除推动节能化之外，对太阳能发电或风力发电等可再生能源的使用正在不断扩大。而各国已宣布将在几十年内全面废止燃油汽车的销售，导入电动车（xEV）实现低碳化的行动，以及未来进一步以脱碳为目标的行动也在迅速开展。

一直以来，富士电机都致力于能源技术的革新。作为能够稳定且最高效利用能源的电力电子设备，功率半导体扮演着关键的角色，富士电机积极开发并进行了产品化，为实现安全放心的可持续发展社会做出贡献。

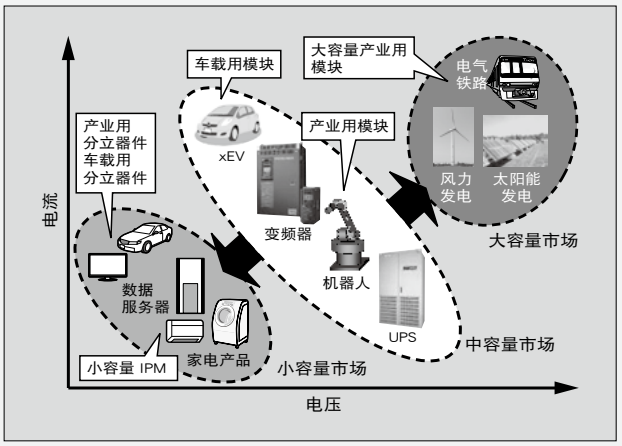

图 1　富士电机的功率半导体产品的应用示例

2 功率半导体及其应用示例

图 1 是富士电机的功率半导体产品的应用示例。富士电机根据用途，开发了各种功率半导体。我们为小容量市场提供了功率分立器件(*1)产品及小容量 IPM(*2)，为中等容量及大容量市场提供了功率模块(*3)，分别用于工业用途及车载用途。另外，作为功率半导体元件的材料，我们开发了使用硅（Si）的产品，和使用碳化硅（SiC(*4)）的产品。

除半导体芯片设计外，功率半导体还有封装的电气设计、散热设计、绝缘设计，以及在一定期间内保持初期特性的长期可靠性设计，这些都很重要。富士电机不断进行技术革新，一直致力于推动功能强、容量大且满足环保要求的功率半导体的开发。

本章将对富士电机所开发的这些功率半导体产品的概要进行介绍。

2.1 功率模块产品（Si）

功率模块产品中，针对空调等家电产品及变频器、伺服器等小容量用途，使用小容量 IPM。即使是小容量 IPM 的目标用途，对节能的要求也是十分迫切的。例如，空调方面，以欧洲为代表的各国要求满足能源消耗效率相关的各项标准，或要求具有低干扰特性能够满足防止电波伤害的 EMC 标准。富士电机推出了满足节能化要求的第 2 代小容量 IPM 产品[(1)~(3)]。以该第 2 代小容量 IPM 为基础，在产品系列中又增加了可主要应用于大型空调、工业变频器的 650 V/50 A、75 A 产品。

对于变频器、机器人、不间断电源装置（UPS）等中等容量的工业用途，采用了第 7 代芯片技术及封装技术的“X 系列”是最新推出的模块及 IPM[(4)、(5)]。

在中等容量市场中，我们推出了适用于混合动力汽车或电动汽车等 xEV 的模块及 IPM 产品[(6)]。对于 xEV 的电

（*1）功率分立器件

由被称为 1 in 1 电路所组成的功率半导体，该电路由 1 个 IGBT 或 MOSFET 的功率半导体元件，以及插入并与其构成反向并联的二极管所组成。形状采用了通用的引脚布局，有 TO-220 及 TO-3P 等。被用于小容量型的 PC 电源、不间断电源装置、液晶显示器及小型电机的控制电路等。

（*2）IPM

Intelligent Power Module 的简称。是一种除功率半导体元件之外，还内置了驱动电路、保护电路的功率模块。除了能够减轻电路设计的负担，通过采用专属的驱动电路还能够最大限度地发挥功率半导体元件的性能。

（*3）功率模块

一种根据用途配置多个二极管或晶体管功率半导体形成电路并进行封装，形态上方便用户使用的器件。根据一个模块中的元件（通常为 IGBT+ 反向并联的 FWD）数目，可称为 1 in 1、2 in 1、6 in 1 等。还搭载了控制功率半导体元件的驱动电路时，被称为智能型功率模块（IPM）。

（*4）SiC

硅（Si）和碳（C）的化合物。存在 3C、4H、6H 等多种结晶结构的多种形态，根据不同的结构，具有 2.2 ～ 3.3 eV 的带隙，作为一种宽禁带半导体被人们所熟知。由于具备高绝缘损坏电压和高热传导率等对功率器件而言有利的物性，因此作为一种可实现高耐压、低损耗、高温运行的器件，其实用化在不断发展。

机驱动用变频器，IGBT(*5)模块是及核心组件之一。为了更有效使用电池电力，除了实现低损耗之外，搭载在引擎室有限的空间内还需要实现小型轻量化，而大容量化也进一步成为了重要的要求。为了满足这些需求，我们开发了搭载了 RC-IGBT(*6)的车载用第 3 代直接水冷型功率模块[7]~[9]。为了追求进一步的小型化和高可靠性，除该第 3 代直接水冷技术之外，还开发了将主电路布线从以往的导线布线改为采用引线框架布线技术的大容量车载用模块[10]、[11]。而且，在以实施过热保护为目的的温度感应方面，通过使用芯片式温度传感器代替以往的 NTC（Negative Temperature Coefficient）热敏电阻，正在开发小型轻量化及大电流的适用于 xEV 的电机驱动用芯片式传感器内置型 IGBT 模块。

并开发了满足电力转换装置进一步小型化及效率化要求的 X 系列大容量模块[12]。另外，还开发了采用低损耗 SiC-SBD(*7)作为 FWD(*8)，采用新封装确保更高效率及可靠性、适用于电气铁路的混合型模块[13]。

要将 IGBT 用于 xEV 等加减速频繁反复的用途，设计时需要充分考虑与装置的寿命、可靠性有关的复杂运行模式中产生的损耗及温度上升。富士电机在 Web 站点上免费公布了对 IGBT 模块产生的损耗及温度进行计算的 IGBT 仿真器[14]。并且进行了升级，使损耗和温度的依赖关系更接近于实际情况。

2.2 功率模块产品（SiC）

作为下一代功率半导体材料，SiC 的普及备受期待。SiC 的频带间隙及热传导率约为 Si 的 3 倍，因此热激发载流子少，产生的热易于扩散，可在高温下运行。而且，其具有可降低损耗的优点。

要减小功率半导体的开关损耗，将 IGBT 替换为 MOSFET(*9)是有效的。但是，Si-MOSFET 存在导通损耗大的问题。SiC 的绝缘破坏电场强度是 Si 的近 10 倍，这表明器件薄化后也能确保高耐压性。而且，由于能够在漂移层中进行高浓度掺杂，具有可降低导通损耗的优点。因此，和 Si-IGBT 相比，在开关元件中采用 SiC-MOSFET 可降低电力转换装置的损耗。通过对 SiC 器件的高温运行、低损耗、高耐压等出色性质的利用，可实现小型、高功率密度的模块。

富士电机为了发挥这些 SiC 器件的出色特点，采用低电感高输出的封装技术，开发了面向小容量及中容量市场的产品。而且，进一步开发了适用于配电设备的大容量产品。

另外，富士电机开发的使用了 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的模块，其低损耗的水平堪称世界一流[15]、[16]。为了进一步实现低损耗，开发了将抑制短通道效应的 halo 结构应用到纵向 SiC 沟槽型栅 MOSFET 中的技术[17]。这是共同研究团体 TPEC（筑波电力电子协作群）的业务内容。

如 **2.1 节**中所述，对于变频器、机器人、UPS 等中容量产业，我们开发了采用第 7 代 Si 芯片技术及封装技术的产品。在高载波频率领域进行电力转换，对电力转换装置更加小型化、高效化的要求不断增加。为了应对该要求，富士电机开发了在 20 kHz 以上的高载波领域可实现低损耗、结合了高速 IGBT 和 SiC-SBD 的高速混合型模块。

2.3 功率分立器件、功率 IC、压力传感器

近年来，随着 IoT（Internet of Things）、大数据、人工智能（AI：Artificial Intelligence）的运用，数据的使用量正在全球范围内增加，服务器及数据中心中导入的 UPS 的高效化不断发展。另外，为了利用太阳能发电等可再生能源，将直流电力转变为交流电力的高效功率调节器（PCS）的需求也在逐渐增加。富士电机开发了实现 UPS 及 PCS 的高效化的分立器件 IGBT。和传统“High-Speed W 系列[18]”相比，此次开发的“XS 系列”对带来恒定损耗的 $V_{CE\ (sat)}$ 与开关损耗进行了改善。

在油耗管制及尾气管制的背景下，车载用压力传感器的搭载数量不断增加。为了实现吸气系统的低油耗，使用压力传感器对空气和燃料的混合比进行高度控制。在排气系统方面，为了使尾气清洁，也需要使用压力传感器对燃烧后气体的再循环量进行高度控制。另外，油箱泄漏检测也要使用压力传感器。富士电机开发了针对这些相对低压用途的压力传感器[19]、[20]。而用于制动器、传动装置、机油油压

(*5) IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistor 的简称。栅极部和 MOSFET 的结构相同，是具有用氧化绝缘膜绝缘的栅极部的电压控制型器件。是一种发挥了 MOSFET 和双极晶体管长处的器件。由于是双极运行因而能进行传导率调制，所以兼顾了应用于变频器时所需的足够的开关速度、高耐压性和低导通电阻。

(*6) RC-IGBT

Reverse-Conducting（逆导通）IGBT 的简称。在模块中将成对使用的 IGBT 和 FWD 整合在一颗芯片中的元件。由于是 IGBT 部和 FWD 部交替运行，因此散热性优异，可减少模块内的芯片数目，因此有助于实现 IGBT 模块的小型化及提升功率密度。

(*7) SBD

Schottky Barrier Diode 的简称。利用因金属和半导体的接合而产生的肖特基势垒、具有整流作用的二极管。由于电气特性优秀，已经开始研究将其应用到 SiC-SBD 的 FWD 中。和同时利用少数载流子的 PiN（P-intrinsic-N）相比，仅靠多数载流子运行的 SBD 的反向恢复速度快，反向恢复损耗小。

(*8) FWD

Free Wheeling Diode 的简称。也叫回流二极管。在变频器等的电力转换电路中与 IGBT 并联，充当 IGBT 关断时将积累在电感器中的能量回流到电源侧的角色。对于 Si 的 FWD，PiN 二极管是主流。由于是同时利用了少数载流子的单极型，因此电流沿正向流通时的电压下降可保持在较小范围，但相应地，反向恢复损耗变大。

(*9) MOSFET

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor 的简称。一种场效应晶体管，是具有用氧化绝缘膜绝缘的栅极部的电压控制型器件。是 LSI 中最常见的结构。由于是单极因而能够实现高速运行，但与耐压相应的，导通电阻也会上升，因此被用作低耐压、高频率的器件。相对于栅极部位于元件表面、通道与元件面平行的平面型栅 MOSFET，沟槽型栅 MOSFET 在元件上形成沟槽并将栅极部嵌入沟槽内，通道与元件面垂直。

控制等的高压传感器的需求也急剧高涨。富士电机对以往的机油油压用第 5 代车载高压传感器进行了改良，开发了在引擎尺寸缩小带来的高温环境下可保证精度的第 6.5 代车载用高压传感器。

根据国际标准 IEC 61000–3–2，电子设备中使用的 75 W 以上的开关电源需要配备抑制高次谐波电流的功率因数改善（PFC）电路。对于 PFC 电路，以节能为目的的待机电力的削减以及轻负载时的效率提升是持续性的要求。富士电机为了满足这样的要求，开发了比以往的第 3 代临界模式 PFC 控制 IC[21]进一步降低了待机电力，提高了轻负载时效率的第 4 代临界模式 PFC 控制 IC。

3 功率半导体的开发情况

以下将对富士电机的功率半导体的开发情况进行概要阐述。详细内容请参考本文后续的各论文。

3.1 第 2 代小容量 IPM650 V/50 A、75 A 的系列化

富士电机开发了满足节能化、低干扰特性要求，集成了构成变频器电路所需功率器件及控制 IC 的小容量 IPM 产品。第 2 代小容量 IPM（2G–IPM）和传统产品相比，降低了损耗且最大运行温度 T_{vjop} 从 125 ℃扩大到了 150 ℃，同时过电流检测及过热保护功能的精度也得到了提高，2015 年，通过运用 X 系列 IGBT 芯片技术，实现了第 2 代小容量 IPM（2G–IPM）中 600 V/10 ～ 30 A 的产品化[2]。进而，增加了以大型空调、工业用变频器为主要用途的 650 V/50 A、75 A 产品系列（**图 2**）。为了确保和以往一样的可靠性及耐受量，该产品实现了对容许电流扩大带来的发热的抑制，降低了封装大型化造成的内部应力（参考第 14 页“第 2 代小容量 IPM 650 V/50 A、75 A 的系列化”）。

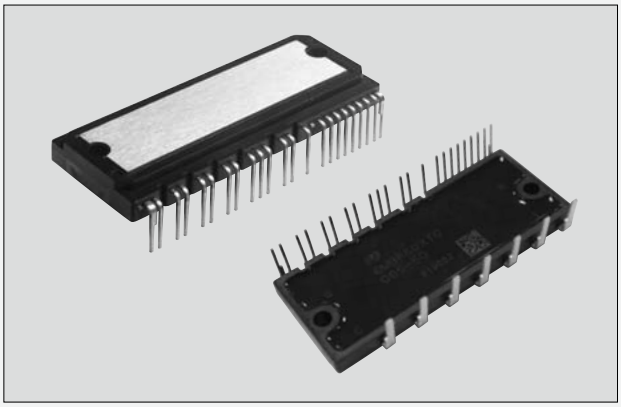

图 2　小容量 IPM（650 V/50 A、75 A）

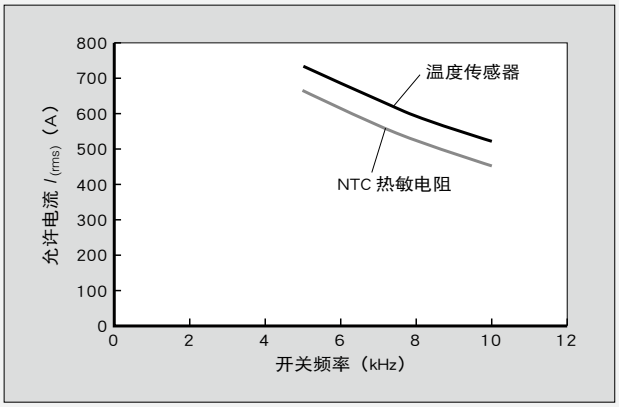

图 3　车载用 IGBT 的芯片式温度传感器和 NTC 热敏电阻的容许电流

3.2 面向 xEV 的电机驱动用芯片式传感器内置型 IGBT 模块

为了满足车载模块的低损耗、小型轻量化及大容量要求，富士电机开发了采用 RC–IGBT 芯片、冷却器一体结构等技术的产品[7]～[10]。为了满足进一步的小型化要求，开发了芯片式传感器内置型 IGBT 模块。传统产品为了实现过热保护，会将 NTC 热敏电阻配置在芯片附近作为温度传感器。该芯片式传感器内置型 IGBT 模块，通过在功率半导体芯片内增加温度传感器二极管，能够更好地高精度监控芯片温度。与 NTC 热敏电阻相比，通过减小器件特性差异或封装热阻差异等对热设计产生影响的各类特性的安全空间，容许电流实现了 13% 的增加。**图 3** 是开关频率为 8 kHz 时，搭载了芯片式温度传感器和搭载了 NTC 热敏电阻的车载用 IGBT 模块的容许电流的比较。这表明容许电流相同时，搭载了芯片式温度传感器的模块和搭载了以往的 NTC 热敏电阻的模块相比，体积可更小（参考第 19 页“面向 xEV 的电机驱动用芯片式传感器内置型 IGBT 模块”）。

3.3 使用仿真器推算 IGBT 模块产生的损耗、温度、寿命

富士电机在 Web 站点上免费公布了对在变频器等电力电子系统中使用富士电机产 IGBT 产品时产生的损耗以及半导体芯片温度进行仿真的软件。本次公开了增加了新功能的 Ver.6。Ver.6 支持三电平电路，以及一般广泛使用的 PWM[*10] 方式。另外，以往版本中计算损耗时将结温 T_{vj} 一律假定为了 125 ℃。在 Ver.6 中，计算功能考虑了 T_{vj} 依赖关系，能够实现更接近实际情况的仿真。和市售的电路仿真器相比，它易于使用，并且能够轻松获得同等精度的结果。另外，也开始能够支持输出与 T_{vj} 存在复杂

（＊10）PWM
Pulse Width Modulation（脉冲宽度调制）的简称。是一种采用开关元件进行电力控制的方式。对于 DC 输入，以一定频率反复进行导通、关断，使导通的时间长度变化从而使输出发生变化。一般被用于使用变频器进行 DC–AC 转换等的场合。

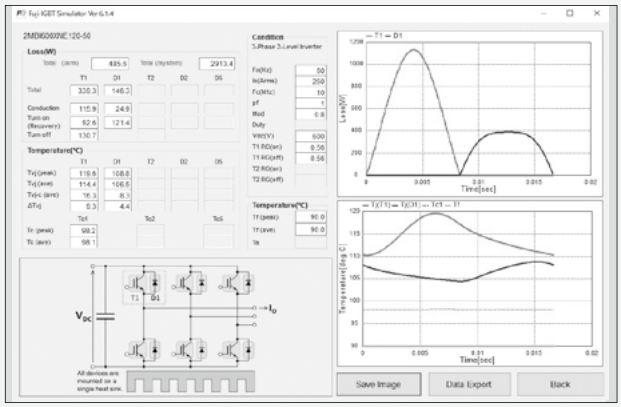

图 4　IGBT 仿真器 Ver.6 的运行画面示例（恒定损耗的计算）

变动的车载模块用途。**图 4** 是 IGBT 仿真器 Ver.6 的运行画面（参考第 32 页“使用仿真器推算 IGBT 模块产生的损耗、温度、寿命”）。

3.4　面向配电设备的搭载有沟槽型栅 MOSFET 的 3.3 kV All-SiC 模块

富士电机从 2014 年 9 月开始，参与了国立研究开发法人 新能源产业技术综合开发机构（NEDO）的“分散型能源新一代电网构建实证事业”项目的开发。在该事业中，为了扩大以太阳能发电为中心的可再生能源的导入，维持并提升电力、设备系统产业方面的国际竞争力，开发了使用 SiC 功率半导体的新一代电压调节设备（配电设备）及其控制系统。富士电机此前面向下一代配电设备，曾开发了 3.3 kV 耐压 All-SiC 200 A 1 in 1 模块[22]。为了实现配电设备的进一步小型轻量化，开发了额定容量扩大到 400 A 的模块（**图 5**）。和传统的 SiC 平面型栅 MOSFET 相比，搭载 SiC 沟槽型栅 MOSFET 大幅降低了产生的损耗。电路构成和以往的 200 A 1 in 1 一样（需要 4 台）时，相比而言，其占用空间减小了 45%（参考第 23 页“面向配电设备的搭载有沟槽型栅 MOSFET 的 3.3 kV All-SiC 模块”）。

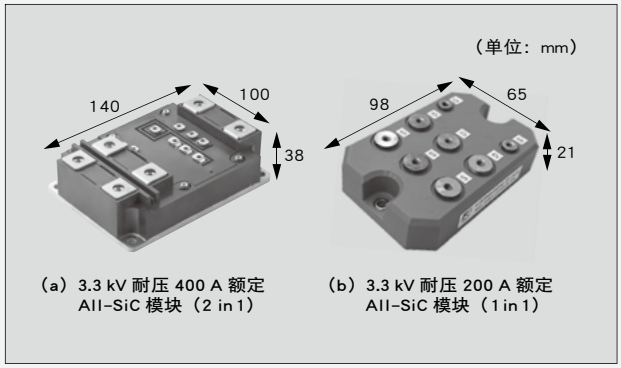

图 5　3.3 kV 耐压 All-SiC 模块

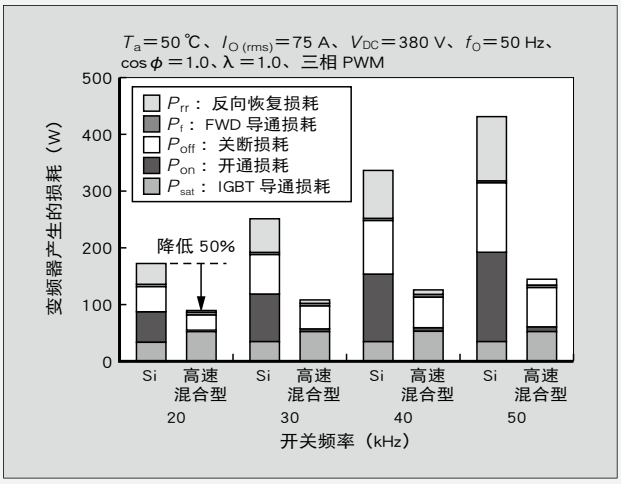

图 6　基于仿真的变频器损耗的比较

3.5　高速 IGBT 和 SiC-SBD 相结合的高速混合型模块

可再生能源领域的电力转换装置等要求在开关频率达 20 kHz 以上的高频区域具有低损耗性，为此，富士电机开发了高速混合型模块可满足这一要求。该产品结合了具有适应高速开关特性的高速 IGBT 和损耗低的 SiC-SBD。该产品采用和以往的 Si 模块相同的封装，电路结构是具有兼容性的 2 in 1 电路。**图 6** 是以 M276 封装的 1200 V/200 A 额定产品为例，搭载所开发的高速混合型模块的分散型小型 PCS 的变频器损耗的仿真结果。产生损耗和搭载 X 系列 Si 模块时相比，总损耗可降低约 50%。另外，在高开关频率下，该降低的比例变大。可有助于通过变频器的高频运行实现高效运转及小型化（参考第 10 页“高速 IGBT 和 SiC-SBD 相结合的高速混合型模块”）。

3.6　利用 halo 结构实现高阈值电压和低导通电阻的 SiC-MOSFET

富士电机对使用 SiC-MOSFET 的小型轻量化 PCS[23] 以及百万瓦级太阳能用 PCS[24] 进行了产品化，为电力电子

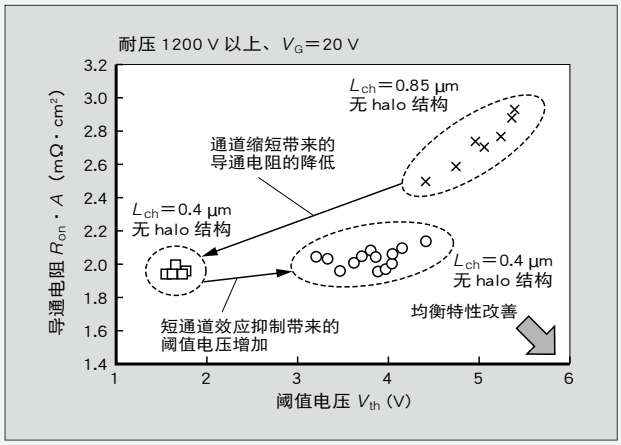

图 7　沟槽型栅 SiC-MOSFET 中的 halo 结构应用效果

设备的节能化做出了贡献。在这些产品中，功率半导体模块发挥着重要的作用。为了降低损耗，针对以往的平面型栅 MOSFET，开发了采用沟槽型栅 MOSFET 的模块[15]。为了进一步降低损耗，此次开发了将 Si 横向 MOSFET 中使用的 halo 结构应用于纵向沟槽型栅 MOSFET 中的技术。在保持高阈值电压的情况下，实现了有助于降低损耗的导通电阻的降低。**图 7** 是导通电阻与阈值电压的关系。缩短通道是一种使导通电阻下降的有效方法。但是，传统结构下由于通道变短会造成阈值电压大幅降低，容易发生误运行（短通道效应）。通过应用可避免短通道效应的 halo 结构，确认了在高阈值电压下能够降低导通电阻（参考第 28 页“利用 halo 结构实现高阈值电压和低导通电阻的 SiC-MOSFET”）。

3.7 650 V 分立器件 IGBT“XS 系列”

在数据使用量在全球范围内增大以及可再生能源使用的增加等社会背景下，UPS 及 PCS 等的需求扩大，富士电机开发了 650 V 分立器件 IGBT“XS 系列”，可广泛搭载于开关电源的 PFC 电路或工业设备的电源电路。该产品和以往的“High-Speed W 系列[18]”相比，改善了导通电压和开关损耗的均衡特性，满足了低损耗的要求。**图 8** 是应用到 UPS 的示例，是在由三电平变频器 I-type 电路构成的 UPS 中使用 XS 系列时对效率的测定结果。UPS 的输出容量为 3 kW，IGBT 开关频率为 4 kHz。采用 XS 系列时，效率在所有负载领域内都超过了 High-Speed W 系列，最大提高了 0.12 点（参考第 42 页“650 V 分立器件 IGBT‘XS 系列’”）。

3.8 第 6.5 代车载用高压传感器

为降低汽车油耗而缩小引擎尺寸会带来高密度安装，这就要求用于引擎油压测定等的高压传感器能在高温下确保精度。富士电机通过对隔膜的直径、厚度、计量电阻的配置位置进行优化，改善了输出的线性特性及电路的温度特性，开发了可在高温下确保精度的第 6.5 代车载用高压传感器（**图 9**）。其结果，将过去第 5 代产品 125 ℃的精度保证温度扩大到了 150 ℃（参考第 46 页“第 6.5 代车载用高压传感器”）。

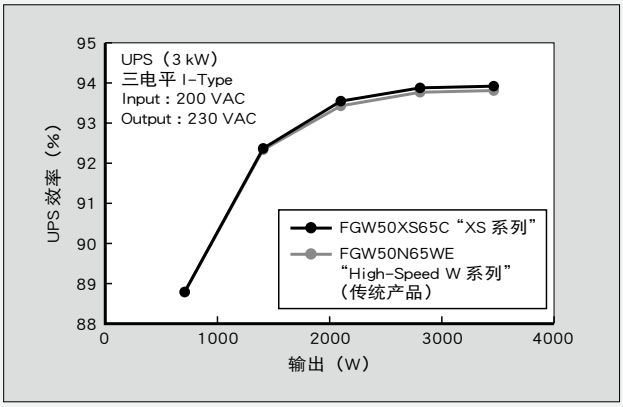

图 8　650 V 分立器件 IGBT“XS 系列”应用后 UPS 的效率

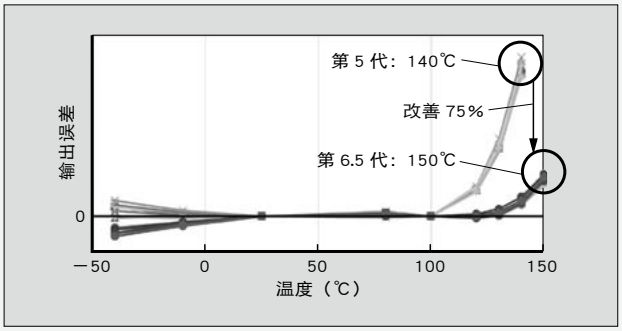

图 9　第 6.5 代车载用高压传感器中的输出误差温度特性

3.9 第 4 代临界模式 PFC 控制 IC“FA1B00 系列”

开关电源作为一种电子设备，可实现比以往的线性电源更加小型轻量化和高效化的效果，得到了广泛的普及。开关电源中的高次谐波电流会造成设备或配电设备的运行故障或功率因数低下，使表观功率增加。因此，国际标准 IEC 61000-3-2 对电源的高次谐波电流做了规定。为了解决该电源高次谐波电流导致的功率因数问题，广泛使用了有源滤波方式的 PFC 电路。富士电机对 PFC 电路的控制 IC 进行了产品化，为实现开关电源的低价格化和节能化做出了贡献。继传统的第 3 代临界模式 PFC 控制 IC“FA1A00 系列[21]”后，又开发了轻负载或待机时可进行高效电源控制的第 4 代临界模式 PFC 控制 IC“FA1B00 系列”。在满足电源高次谐波电流规定的同时，还实现了 PFC 电路输出电容器的小型化。此外，还采用了一种兼顾控制输出电压纹波和降低电源高次谐波电流的新控制方式。采用新方式，输出电压纹波在所有输入电压范围内都可控制在传统方式的 70% 的水平（**图 10**）。效率或功率因数等基本特性和传统方式不存在差异，并且也满足了电源高次谐波电流特性，通过新方式降低了输出电压的纹波，对于 PFC 电路部可实现专属面积大的平滑电容器的小型化（参考第 37 页“第 4 代临界模式 PFC 控制 IC‘FA1B00 系列’”）。

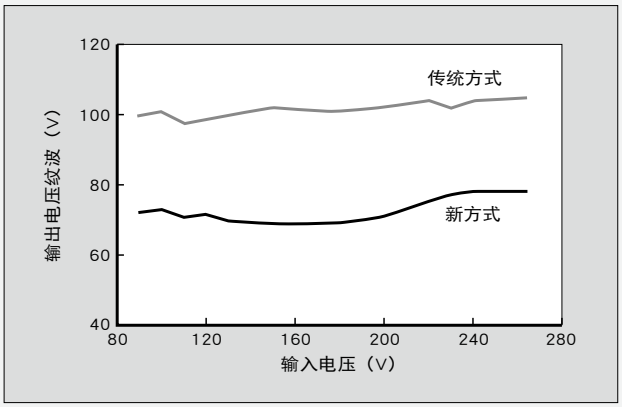

图 10　输出电压纹波比较（平滑电容器容量：15 μF）

4 后记

富士电机一直以来致力于能源技术的革新，将“通过能源、环境技术的革新，为实现安全安心、可持续发展的社会做出贡献”作为经营方针。电力电子设备引领着需求越来越高涨的节能化、低碳脱碳化以及环境保护的发展，我们将通过对其核心器件功率半导体进行技术革新，为实现可持续发展的社会做出贡献。

参考文献

⑴ 手塚伸一等. 第 2 代小容量 IPM 的系列化. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.1, p.28-32.

⑵ 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.

⑶ Ohashi, H. et al.“The 2nd Generation Small Inteligent Power Module for General-purpose Inverter”proc. 2016 PCIM Asia.

⑷ 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.

⑸ Heinzel, T. et al.“The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”, Proc. PCIM Europe 2015.

⑹ 郷原広道ほか. ハイブリッド自動車用 IPM のパッケージ技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.258-262.

⑺ 荒井裕久等. 车载用第 3 代直接水冷型功率模块. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.1, p.29-33.

⑻ 高下卓马等. 搭载 RC-IGBT 的车载用第 3 代直接水冷型功率模块的速度提升. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.1, p.33-36.

⑼ 佐藤宪一郎等. 搭载 RC-IGBT 的车载用第 3 代直接水冷型功率模块的高功能化. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.1, p.37-40.

⑽ 大泽彰浩等. 车载用大容量 IGBT 模块“M660”. 富士電機技報. 2018, vol.C10, no.1, p.24-27.

⑾ Nakano, H. et al.“Impact of I2t Capability of RC-IGBT and Leadframe Combined Structure in xEV Active Short Circuit Survival”, Proc. PCIM Europe 2018.

⑿ 山本拓也等. 第 7 代“X 系列”1700V IGBT 模块“PrimePACK ™”. 富士电机技术期刊. 2018, vol.C10, no.1, p.11-14.

⒀ 关野裕介等. 大容量 SiC 混合模块“HPnC”. 富士电机技术期刊. 2018, vol.C10, no.1, p.15-19.

⒁ Fuji IGBT シミュレータ. https://www.fujielectric.co.jp/products/semiconductor/model/igbt/simulation/, (accessed 2018-09-20).

⒂ 中泽将刚等. 搭载有 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C10, no.1, p.3-6.

⒃ Harada, S. et al.“1200V SiC IE-UMOSFET with Low On-resistance and High Threshold Voltage”, Materials Science Forum, 2017, vol. 897, p.497-500.

⒄ Kobayashi, Y. et al.“Low on-resistance SiC trench MOSFET with suppressed short channel effect by halo implantation”ICSCRM, FR.D2.1, 2017.

⒅ 原幸仁等. 高速分立器件 IGBT“High-Speed W 系列”. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.1, p.55-59.

⒆ 西川睦雄ほか. 第 6 世代小型圧力センサ. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.420-424.

⒇ 鹈泽良平等. 第 6.5 代车载用压力传感器. 富士电机技术期刊. 2018, vol.C10, no.1, p.28-31.

㉑ 菅原敬人等. 第 3 代临界模式 PFC 控制 IC“FA1A00 系列”. 富士电机技报. 2015, vol.C7, no.1, p.25-28.

㉒ 谷口克己等. 配电设备用 3.3 kV 耐压 All-SiC 模块. 富士电机技术期刊. 2018, vol.C10, no.1, p.7-10.

㉓ 松本康等. 搭载碳化硅 (SiC) 元件的电力电子设备. 富士时报. 2013, vol.C5, no.1, p.60-64.

㉔ 大岛雅文等. 搭载有 All-SiC 模块的百万瓦级太阳能用 PCS“PVI1000 AJ-3/1000”. 富士电机技报. 2015, vol.C7, no.2, p.60-64.

藤平 龙彦

从事电子元件的研究开发。现为富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部部长。工学博士。电气学会会员、应用物理学会会员、日本金属学会会员、IEEE 会员。

宫坂 忠志

从事电子元件事业运营。现为富士电机株式会社电子元件事业本部电装事业部部长。电气学会会员。

井川 修

从事电子元件的事业运营。现为富士电机株式会社电子元件事业本部产业事业部部长。工学博士。电气化学会会员。

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。