高速 IGBT 和 SiC-SBD 相结合的高速混合型模块

High Speed Hybrid Modules Combining High Speed IGBTs with SiC-SBDs

臼井 亮辅 USUI, Ryosuke　　加藤 由晴 KATO, Yoshiharu　　高桥 圣一 TAKAHASHI, Seiichi

近年来，为了进一步实现电力转换装置的小型轻量化和高效化，需要在高频区域进行电力转换的应用日益增多，这就要求开关器件速度更快和损耗更低。富士电机将高频区域下，损耗低的高速 IGBT 和 SiC-SBD 相结合，开发了高速混合型模块，实现了开关损耗的大幅降低。其结果，变频器在高频运行时产生的损耗与以往相比可降低约 50%，有望用于要求小型轻量化及高效化的应用中。

In recent years, there have been an increasing number of power converter applications that require power conversion in the high frequency region to achieve further compactness, weight savings and high efficiency for their power converters. Switching devices are thus greatly demanded for high speed and low loss. Fuji Electric has developed a high speed hybrid module combining IGBTs with SiC-SBDs, both of which operate with low loss and high speed in the high frequency region, significantly reducing switching loss. As a result, power dissipation during high-frequency inverter operation can be reduced by approximately 50% compared with existing products, thereby increasing expectations that it can be utilized with applications that require compactness, weight savings and high efficiency.

1 引言

近年来，为了抑制全球变暖，要求降低温室气体 CO_2 的排放量。在这样的背景下，除了普及太阳能发电或风力发电等可再生能源之外，在有限的用地中更有效地进行电力转换也十分重要。因此，为了实现以变频器为代表的电力转换装置的小型化和高效化，多在 20 kHz 以上的高频率下进行电力转换。

于是，富士电机将开关频率达到 20 kHz 以上的高频率且损耗低的高速 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 和 SiC-SBD (Silicon carbide-Schottky Barrier Diode) 相结合，开发出了可容纳在以往封装内的高速混合型模块。

本文将对该产品的特点及其应用效果，以及对电力转换装置的贡献进行介绍。

2 高速混合型模块的概述

图 1 是功率器件的开关频率和电力容量的应用情况。高速混合型模块的主要应用在于可再生能源设备、车载相关设备、不间断电源装置 (UPS : Uninterruptible Power System) 等电力转换装置，需要在高频率下进行电力转换。

表 1 是高速混合型模块的外观，**表 2** 是高速混合型模块的产品系列。在高速混合型模块中，采用了和以往 Si 模块相同的封装保持了兼容性，电路结构是高速 IGBT 和 SiC-SBD 相结合的 2 in 1 电路。IGBT 方面以现有的 IGBT 为基础，采用最适合进行高速开关的芯片，FWD (Free Wheeling Diode) 方面则采用了 SiC-SBD 芯片。

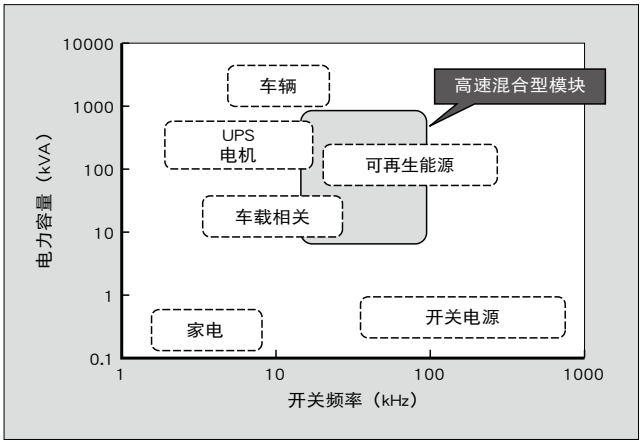


图 1　高速混合型模块的主要应用

表 1　高速混合型模块

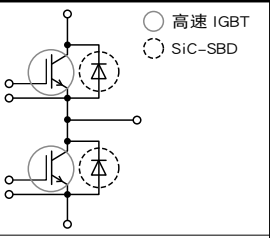
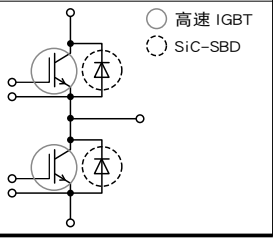
封装	等效电路
Standard 2 in 1 M276	 高速 IGBT SiC-SBD
Dual XT M254	 高速 IGBT SiC-SBD

表 2　高速混合型模块的产品系列

封装	电路结构	外形尺寸 W×D×H（mm）	额定电压（V）	额定电流（A）
Standard 2 in 1	2 in 1	62.0×108.0×30.9	1200	200
				300
Dual XT	2 in 1	62.0×150.0×20.5	1200	300

3　高速混合型模块的特点

为了实现通过高速开关促进装置的小型化与高效化，改善 IGBT 模块产生的损耗十分重要。该产生的损耗与 IGBT 或 FWD 等半导体芯片的特性存在密切关系。因此，本章将对高速开关用高速 IGBT 和 SiC-SBD 芯片的特性进行介绍。

3.1　高速 IGBT 产生的关断损耗的改善

图 2 是 1200 V 高速 IGBT 的集电极、发射极饱和电压 $V_{CE\ (sat)}$ – 关断损耗 E_{off} 的均衡特性。高速 IGBT 的规格是以现有的 IGBT 为基础，针对大幅降低寄生容量的活性区和抑制空穴注入的集电极层降低杂质浓度，与第 7 代“X 系列”的 IGBT 相比，可减少关断损耗，并令 $V_{CE\ (sat)}$ – E_{off} 均衡特性适应高速开关[1]。

图 3 是额定 1200 V/200 A 的高速混合型模块和 X 系列 Si 模块的关断波形的比较。高速混合型模块大幅改善了关断时的尾电流，与 X 系列 Si 模块相比，关断损耗 E_{off} 降低了 33%。

3.2　SiC-SBD 的反向恢复损耗和开通损耗的改善

图 4 是额定 1200 V/200 A 的高速混合型模块和 X 系列 Si 模块的反向恢复波形的比较。高速混合型模块的反向恢复电流的峰值减小了约 60%。这是由于 SiC-SBD 是一种单极元件，不存在少数载流子的注入。高速混合型模块的反向恢复损耗 E_{rr}，和 X 系列的 Si 模块相比降低了 92%。

另外，FWD 中反向恢复电流的峰值，被反映到了对臂侧的 IGBT 的开通电流峰值中。如减小反向恢复电流的峰值，则开通电流的峰值也会变小，因此可降低开通损耗[2]。**图 5** 是额定 1200 V/200 A 的高速混合型模块和 X 系列 Si 模块的开通波形的比较。和反向恢复波形一样，开通电流峰值减小了约 60%，表现出了 SiC-SBD 的优秀特点。高速混合型模块的开通损耗 E_{on}，和 X 系列 Si 模块相比降低了 84%。

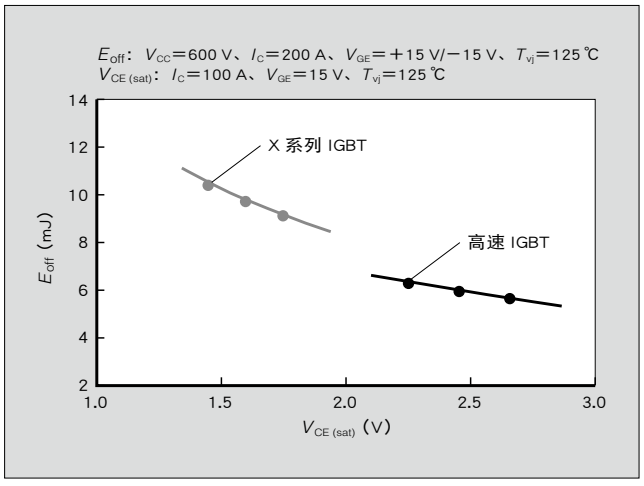


图 2　1200 V 高速 IGBT 的 $V_{CE\ (sat)}$ – E_{off} 特性

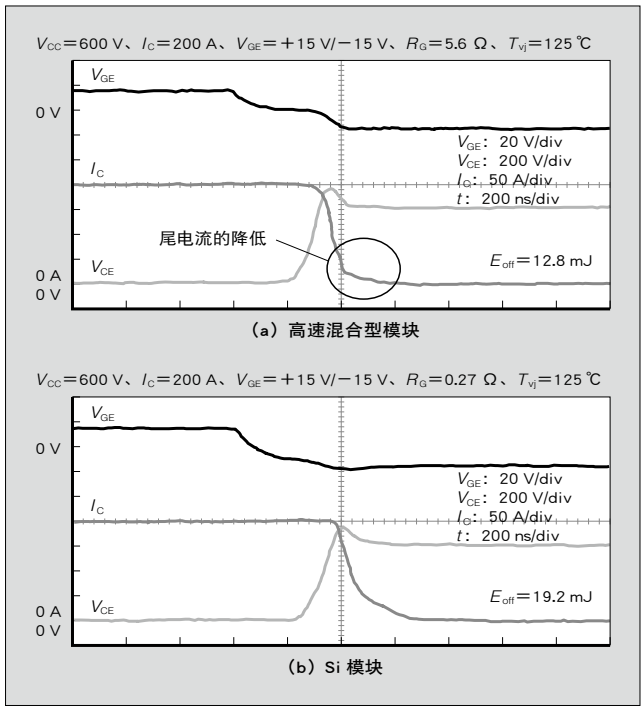


图 3　关断波形

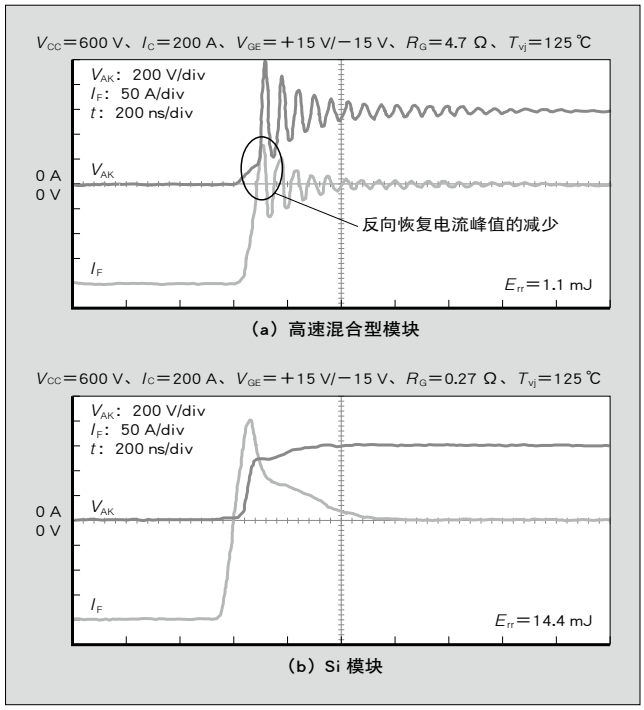


图 4　反向恢复波形

3.3　开关损耗降低效果

表 3 是高速混合型模块和 X 系列 Si 模块的损耗比较表。与 X 系列 Si 模块相比，高速 IGBT 和 SiC-SBD 相结合的高速混合型模块实现了总损耗大幅降低了 66%。

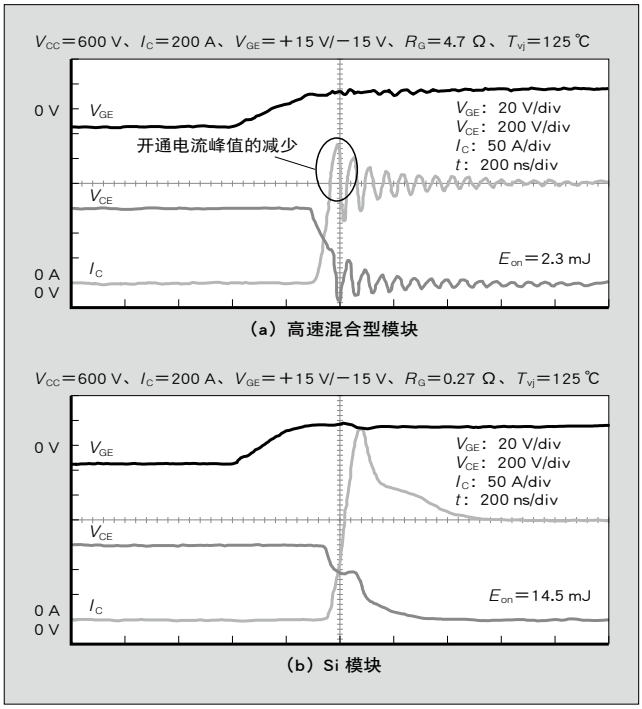


图 5　开通波形

表 3　开关损耗比较

	E_{on}（mJ）	E_{off}（mJ）	E_{rr}（mJ）	总损耗（mJ）
X 系列 Si 模块	14.5	19.2	14.4	48.1
高速混合型模块	2.3	12.8	1.1	16.2
降低率	84%	33%	92%	66%

4　高速混合型模块的效果

下面以 M276 封装的额定 1200 V/200 A 的产品为例，对搭载了该模块的分散型小型功率调节器（PCS：Power Conditioning System）的变频器损耗和芯片接合温度进行介绍。

图 6 是变频器损耗的仿真结果。在开关频率达 20 kHz 以上的高频领域内，在搭载了高速混合型模块的变频器产生的损耗中，IGBT 的恒定损耗 P_{sat} 由于 $V_{CE\ (sat)}$ 较高，与搭载了 X 系列 Si 模块时相比有少许增加，但开关损耗大幅降低。

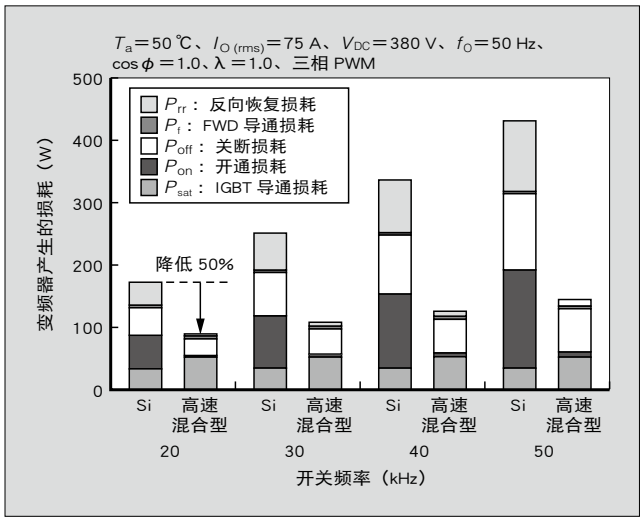


图 6　基于仿真的变频器损耗的比较

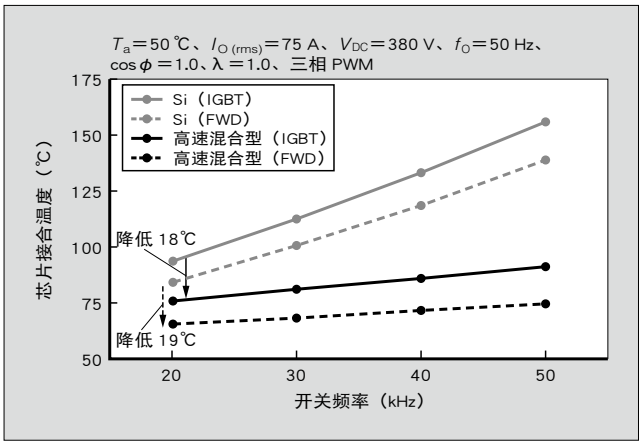


图 7　搭载变频器时的芯片接合温度

最终结果，总损耗可降低 50%。另外，提高开关频率后该降低的比率增高，有助于通过变频器的高频运行实现高效运转及小型化。

图 7 是搭载于变频器时的芯片接合温度。在开关频率为 20 kHz 时，高速混合型模块的芯片接合温度与搭载 X 系列 Si 模块时相比，IGBT 约低 18 ℃，FWD 约低 19 ℃，因此变频器高频运行时可增大输出电流。

5　对电力转换装置的帮助

图 8 是电感器体积和开关频率的依赖关系[3]。当开关频率达到 30 kHz 的高频率时，与 10 kHz 时相比，电感器体积可减小约 50%。通过高速开关使电感器等被动型元器件小型化，可实现装置整体的小型化，有望降低成本。

图 9 是 PCS 中使用高速混合型模块的应用实例，**图 10** 是 UPS 中使用高速混合模块的应用实例。分散型太阳能发电的普及要求 PCS 的小型轻量化。而在服务器与数据中心，为了保证高可靠性，需要并联冗余式 UPS。在并联冗余构成方式中，由于使用了多个 UPS，要求装置的小型化。通

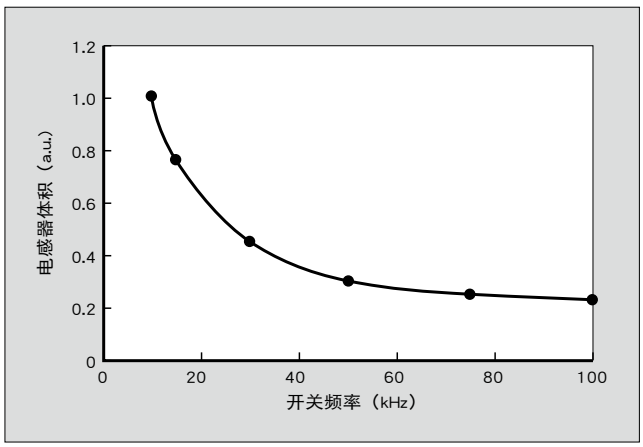


图 8　电感器体积和开关频率的依赖关系

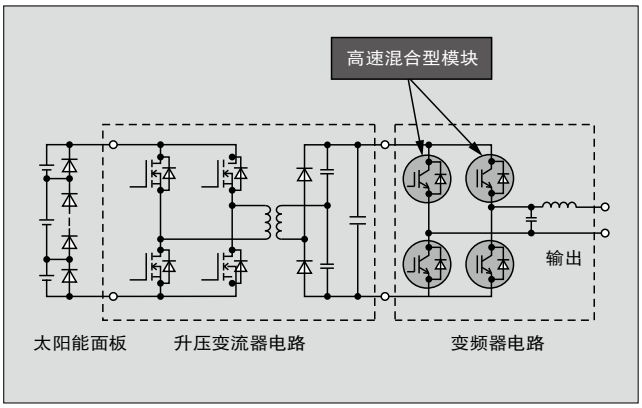


图 9　使用高速混合型模块的 PCS 的电源结构

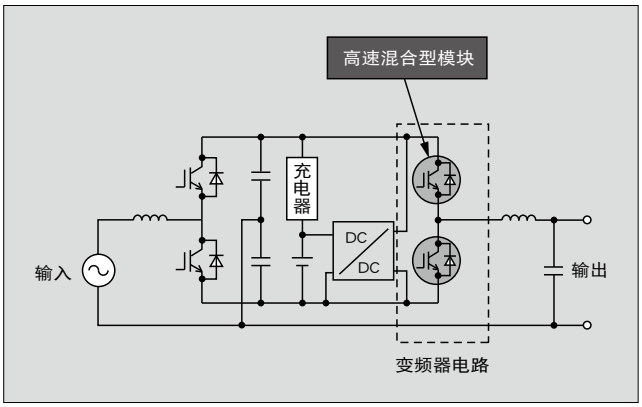


图 10　使用高速混合型模块的 UPS 的电源结构

过搭载高速混合型模块，体积与重量都很大的电感器或电容器等滤波电路，在高频率下实现了小型化，因此可帮助实现装置的小型轻量化。此外，由于高频领域下的损耗低，有望实现电力转换效率的提升。

图 11 是将高速混合型模块用于焊接机所使用的电力转换装置的应用实例。在焊接机、等离子切割机、感应加热

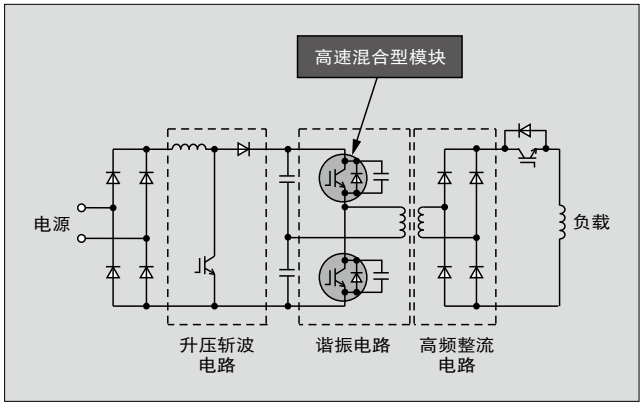


图 11　使用高速混合型模块的焊接机的电源结构

(IH) 等高频绝缘方式的电子转换装置中，为了将变压器部分小型化，需要高速开关。在这些应用中为了实现高速开关的低损耗及低干扰，采用了谐振电路方式。该电路方式以 20 kHz 以上的高速开关驱动，因此通过使用高速混合型模块，可实现电力转换装置的小型化、高效化。

另外，在具有小型轻量化及高效化要求的 X 光等的医疗器械电源、EV 的快速充电器，以及燃气轮机等场景的应用也令人期待。

6　后记

以上对高速 IGBT 和 SiC–SBD 相结合的高速混合型模块进行了介绍。通过使用高速 IGBT 和 SiC–SBD 降低开通损耗，从而实现了高频运行下的损耗降低。

以高频率进行电力转换的应用不断增多，富士电机今后将进一步推动低损耗化，开发迎合市场需求的产品，对节能事业做出贡献。

参考文献

⑴　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.
⑵　小根泽巧等. 1700V 耐压 SiC 混合模块. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.1, p.7-10.
⑶　荒木隆宏，伊東淳一.“ワイドバンドギャップデバイスを用いたモータドライブ用 PWM インバータの基礎検討”. 電気学会研究会資料. EDD, 電子デバイス研究会, 2012, SPC-12-126, EDD-12-053.

臼井　亮辅
从事 IGBT 模块的开发和设计。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。

加藤　由晴
从事功率半导体元件的开发和设计。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元件开发部。

高桥　圣一
从事 IGBT 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。博士（理学）。

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。