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

Functionality Enhancement of 3rd-Generation Direct Liquid Cooling Power Modules for Automotive Applications Equipped with RC-IGBT

佐藤 宪一郎 SATO, Kenichiro　　榎本 一雄 ENOMOTO, Kazuo　　长畦 文男 NAGAUNE, Fumio

富士电机开发出针对混合动力汽车和电动汽车的车载用第 3 代直接水冷型功率模块。车载用功率模块面临着低损耗化和小型化的要求。新型模块采用了水冷散热片和罩一体化的铝制水冷套和法兰结构的冷媒出入口，改善了散热性。另外，适用了 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 和 FWD (Free Wheeling Diode) 一体化的 RC-IGBT (逆导型 IGBT)，以相同的活性面积减少了 20% 的电力损耗。由此，实现了功率模块的低损耗化和小型化。

Fuji Electric has developed a 3rd-generation direct liquid cooling power module for automotive applications such as hybrid and electric vehicles. Power modules for automotive applications are required to be compact and exhibit low power loss. We have improved heat dissipation performance of the module by using an aluminum water jacket that combines the liquid cooling fins with cover as well as refrigerant inlet and outlet ports with a flange structure. In addition, employing a reverse conducting IGBT (RC-IGBT) that integrates an insulated gate bipolar transistor (IGBT) with free wheeling diode (FWD) enables the power module with the same active area to reduce power loss by 20%. As a result, the power module has achieved a lower loss and a smaller size.

1 引言

世界各国正在加速落实削减 CO_2 排放量、保护地球资源的措施，汽车厂商则积极推动着混合动力汽车 (HEV) 和电动汽车 (EV) 的开发。HEV 和 EV 为了运行电动机而采用了变频器，其中关键的组件之一就是 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 模块。为高效使用电池电力，IGBT 模块被要求实现低损耗化和小型化。

为响应这些要求，过去，富士电机提供了采用直接水冷方式的 IGBT 模块产品，并持续推进着开发[(1)~(4)]。此次，富士电机开发出了相比过去的车载用直接水冷型功率模块，具备更高性能和功能的车载用第 3 代直接水冷型功率模块 (车载用第 3 代模块)。

本稿将对搭载 RC-TGBT (Reverse-Conducting IGBT：逆导型 IGBT[(5)]) 的车载用第 3 代直接水冷型功率模块的高功能化进行介绍。

2 特点

此次开发的车载用第 3 代模块的外观如**图 1** 所示。本产品凭借优化冷媒的流路设计，实现了比旧型产品更高的散热性能。采用罩一体型铝制水冷套和法兰结构的冷媒出入口，用户只需考虑向法兰出入口流动指定流量的冷媒即可。

车载用第 3 代模块的主要产品规格如**表 1** 所示，**图 2** 是模块的等效电路。产品特点如下所示。

(1) 功率模块的小型化

IGBT 适用了第 7 代芯片技术，降低了损耗，同时还采用了将 IGBT 和 FWD (Free Wheeling Diode) 单芯片化的 RC-IGBT，使功率模块的体积缩小了 15%。另外，在 RC-IGBT 中搭载了检测 IGBT 电流和结温的功能，可在兼顾小型化的同时尽量发挥芯片性能，还可针对短路和过热，切实进行保护。

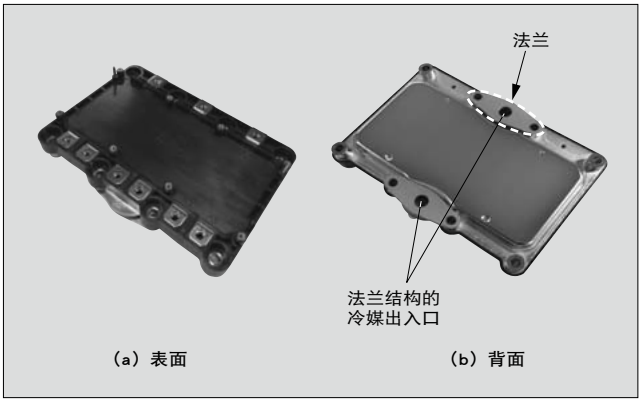

图 1　车载用第 3 代模块

表 1　车载用第 3 代模块的主要规格

项目	额定和特性
集电极 - 发射极间电压	750 V
额定电流	800 A
最大运行温度	175 ℃
外形尺寸	W162×D116×H24 (mm)
绝缘耐压	2500 V (交流有效值)
IGBT 部饱和电压	1.45 V (25 ℃，800 A)
FWD 部正向电压	1.50 V (25 ℃，800 A)
IGBT/FWD 部热阻	0.14 ℃/W (10 L/min，LLC)
质量	560 g

车载用第 3 代模块如**图 2** 所示，各臂的 IGBT 部除了驱动所必需的栅极和发射极端子，还配置了温度检测用二极管阳极和阴极端子、电流检测用端子。温度检测用二极管内置于 RC-IGBT 中。

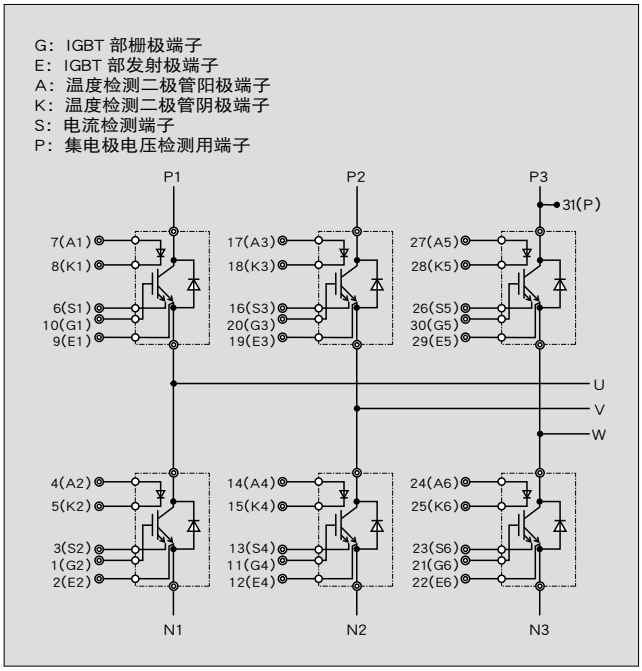

图 2　车载用第 3 代模块的等效电路

⑵　具备高散热性能的冷却器结构

凭借水冷散热片和罩一体化的冷却器结构，提升了散热性，实现了薄型化。冷媒出入口采用了法兰结构，与变频器箱体间的水密性用 O 型圈等确保。

⑶　主端子配线的低电感化

通过使连接到平滑电容器上的各相的输入端子独立，以及配线最短化，降低了电感，减少了高速开关运行产生的开关损耗和电流切断时的浪涌电压[6]。

3　实现高功能化的核心技术

3.1　RC-IGBT 的设计技术

RC-IGBT 的概要结构如**图 3** 所示。本结构采用电场终止（FS）型 IGBT，使 IGBT 区域和 FWD 区域以条纹状交替配置于一个芯片上。凭借单芯片化，可削减确保芯片周围耐压的护环区域，相比过去两个芯片的结构，缩小了芯片面积。另外，IGBT 运行时可从 FWD 部散热，FWD 运行时也可从 IGBT 部散热，因而具有分别降低 IGBT 和 FWD 运行时的热阻的效果。并且，凭借最新的薄晶圆化技术、沟槽结构、沟道密度等的优化，可实现低损耗化和芯片的小型化，为模块的小型化做贡献。对 IGBT 区域和 FWD 区域的比率，

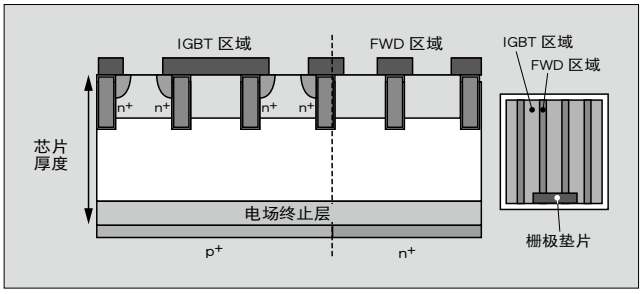

图 3　RC-IGBT 的概要结构

在考虑了变频器动力[注 1]运行和再生[注 2]运行后进行了优化。另外，通过 IGBT 和 FWD 的一体化，IGBT 部关断时，FWD 区域也被用作载流子的排出路径，从而可降低 RC-IGBT 的关断损耗。

凭借采用 RC-IGBT，IGBT 区域和 FWD 区域分配的优化，以及最新一代芯片技术的应用，改善了 IGBT 模块的电气特性，降低了电力损耗。且在相同活性面积下，电力损耗减少了 20%[7]。

3.2　RC-IGBT 的保护技术

IGBT 技术的世代更替不断推进，若饱和电压、开关损耗降低，则短路保护将变得非常重要。换言之，由于短路电流会随着饱和电压的降低而增加，因此，必须防止超出短路耐量，在短时间内关断电流的同时，还要抑制浪涌电压的增加。为了在 RCIGBT 发生短路时可高速切实地关断电流，在车载用第 3 代模块中采用了电流检测方式的短路保护（**图 4**）。这种方式在短路发生时，将把部分短路电流分流到电流检测端子上，利用相连的电阻器上产生的电流检测用电压 V_{SC}，运行短路保护功能。通过设定串联的电阻器 R_{SE1} 和 R_{SE2} 的电阻值，设定开始短路保护的电流值。富士电机准备了模块评估用驱动基板，上面搭载了电流检测方式的短路保护电路。在此，我们将介绍评估用驱动基板的功能和短路保护的设计思路。

⑴　评估用驱动基板

安装于车载用第 3 代模块上的评估用驱动基板如**图 5** 所示。评估用驱动基板具有 6 个臂的 IGBT 部驱动电路，栅极驱动电压为＋15/−0V（导通电压 / 关断电压）。为了在检测短路的同时抑制短路电流，驱动基板具备使栅极驱动电压处于钳位状态的功能。另外，除了短路保护功能，还设置了**图 2** 所示的功率模块集电极电压检测用端子，实现对输入到功率模块中的直流电压进行监视的功能。

图 6 展示了车载用第 3 代模块中，使用评估用驱动基板的短路保护动作波形的示例。此时的短路保护过程如下所示。

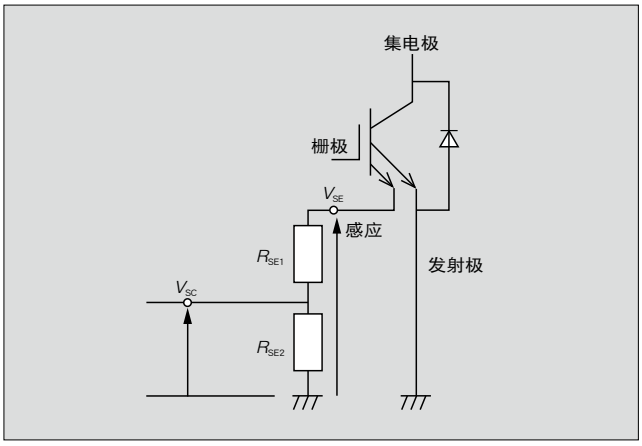

图 4　电流检测方式的短路保护

〈注 1〉动力：将电动机的动力传递给机械，使机械加速

〈注 2〉再生：将减速时电动机产生的电力返还给电池

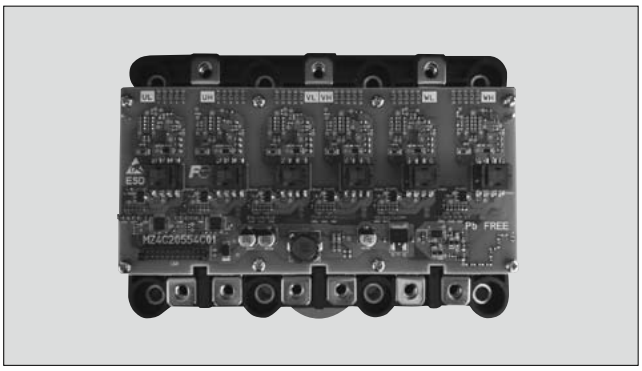

图 5　安装于车载用第 3 代模块的评估用驱动基板

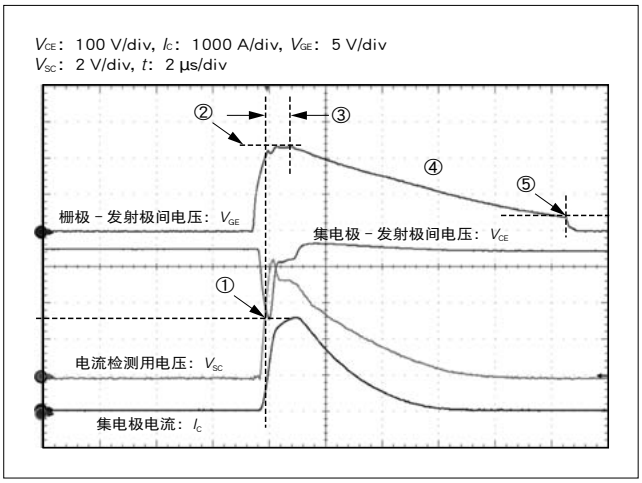

图 6　短路保护运行波形

(a)　发生短路，V_{SC}（**图 4**）上升（**图 6** ①）。

(b)　从 V_{SC} 超过判断为短路电流的阈值电压时开始，为抑制短路电流，栅极 – 发射极间电压将为 12V，呈栅极钳位的状态（**图 6** ②）。

(c)　若短路状态持续，栅极钳位状态也将持续（**图 6** ③）。

(d)　若栅极钳位状态持续一段时间，则判断为发生短路的异常状态，将执行栅极 – 发射极间电压缓慢下降的软关断功能（**图 6** ④）。

(e)　之后，以远低于 IGBT 的栅极阈值的栅极 – 发射极间电压结束软关断，并在通常的短路状态下关断栅极 – 发射极间电压（**图 6** ⑤）。

⑵　短路保护设计的要点

必须在不引发器件损坏的前提下准确检测短路动作，进行短路保护，短路保护设计的要点如下所示。

(a)　短路检测电压

决定检测短路电流的电压值。

(b)　V_{SC} 最大电压

设定在驱动 IC 的耐压以下。

(c)　栅极钳位电压

决定短路电流的限制值。

(d)　栅极钳位电压保持时间、软关断运行时间

分别决定可使短路能量保持在破坏级别以下的时间。

另一方面，在 IGBT 的正常开关动作中，必须将 V_{SC} 设定为最大适用电流范围内，低于短路检测电压的值。万一在正常运行状态下误检测了短路，会导致 IGBT 的开关损耗增加，以及引发装置的误动作。在设定上述短路保护中的短路检测电压时，还必须考虑正常运行时 V_{SC} 的变动。

⑶　评估结果的示例

图 7 展示了包括开通时 V_{SC} 的变动在内的波形，**图 8** 展示了短路状态和开通时的 V_{SC} 的芯片温度依赖性。

图 7 中从(ⅰ)到(ⅲ)的期间内的 V_{SC} 的动作如以下所示。

(a)　期间(ⅰ)

集电极电流增加，受电流变化影响，V_{SC} 过渡性上升。这一期间是正常运行的范围，必须设定为不检测短路的期间。

(b)　期间(ⅱ)

集电极电流达到了一定值，但这一期间内，栅极 – 发射极间电压将保持为 IGBT 的阈值电压级别，这一期间内将产生较高的 V_{SC}。应该在这一期间内检测短路，但为防止误检测，通常开关时，必须设定 V_{SC} 低于短路检测电压。

(c)　期间(ⅲ)

开通电流和栅极 – 发射极间电压转变为规定的设定值的期间，V_{SC} 也是较低的值。

图 8 所示的开通时的 V_{SC} 是期间(ⅱ)的值，在适用的总电流和全温度区域内，这一值必须低于短路检测电压。另外，

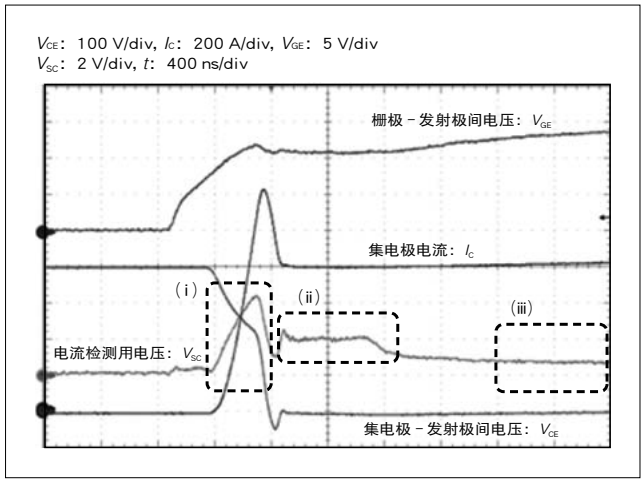

图 7　开通动作波形

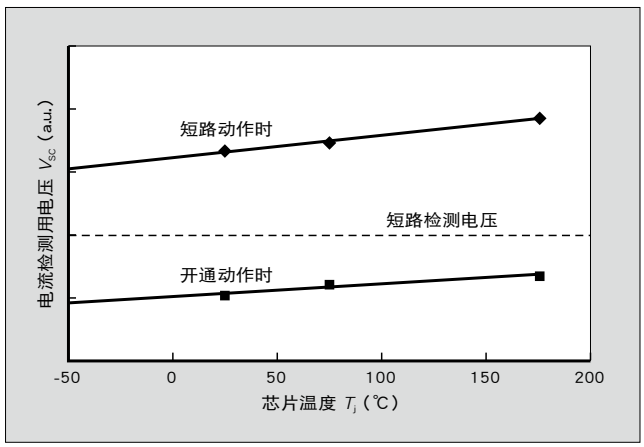

图 8　电流检测用电压的芯片温度依赖性

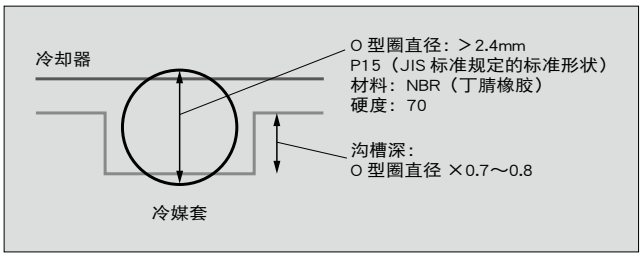

图 9　使用 O 型圈的密封示例

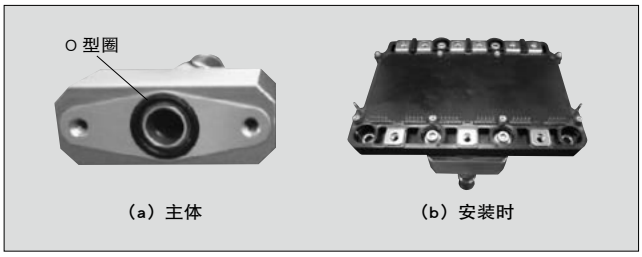

图 10　法兰连接用适配器

短路保护时的栅极钳位期间，必须在考虑了上述的通常开关时的期间(ⅰ)后再做设定。

3．3　高散热冷却器所适用的技术

车载第 3 代模块中采用了罩一体型铝制水冷套和法兰结构的冷媒出入口。通过使散热片和水冷套一体化，以及改善散热片的形状，使散热性比传统产品提升了 30%[7],[8]。车载用第 3 代模块的特点在于在冷媒出入口采用了法兰结构，这里，我们将对如何确保使用 O 型圈的法兰结构的密封性进行介绍。

直接水冷型功率模块借助密封材料，用法兰安装到装置箱体上。必须使用即使使用温度、冷媒压力发生变化，也能防止冷媒泄漏的密封。**图 9** 展示了在车载用第 3 代模块上使用 O 型圈的例子。实际上，受使用环境和通电条件的影响，装置整体会发生变形、振动等，因此，必须在使用环境下维持 O 型圈始终以适当的变形幅度，连接于法兰和箱体上。

富士电机准备了与法兰连接、流通冷媒用的适配器，用于用户评估。**图 10** 展示了法兰连接用适配器的外观。

4　后记

本稿对搭载 RC-IGBT 的车载用第 3 代直接水冷型功率模块的高功能化进行了介绍。实现功率模块高功能化的核心技术 RC-IGBT 及其保护技术，以及实现直接水冷的冷却器所适用的技术，将为用户变频装置的设计提供支持。今后，富士电机将进一步推进技术革新，推出更多使用方便的高功能产品，提供给广大用户。

参考文献

(1)　日達貴久ほか. 車載用直接水冷 IGBT モジュール. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.308-312.

(2)　安達新一郎ほか. 車載用 IGBT モジュールの直接水冷技術. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.435-439.

(3)　高橋良和ほか. パワー半導体の現状と展望. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.234-239.

(4)　Higuchi, K. et al. “An intelligent power module with high accuracy control system”. Proceedings of PCIM Europe 2014, May 20-22, Nuremberg, p.39-46.

(5)　吉田崇一等. 车载用 RC-IGBT. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.1, p.38-41.

(6)　Adachi, S. et al. “Automotive power module technologies for high speed switching”. Proceedings of PCIM Europe 2016, May 10-12, Nuremberg, p.1956-1962.

(7)　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.

(8)　乡原广道等. 车载用第 3 代功率模块的封装技术. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.1, p.34-37.

佐藤 宪一郎

从事混合动力车用 IGBT 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事业统括部 EV 模块技术部。

榎本　一雄

从事混合动力车用 IGBT 模块的开发。现为富士电机株式会社电子元件事业本部事业统括部 EV 模块技术部主查。

长畦　文男

从事混合动力车用 IGBT 模块的开发。现为富士电机株式会社电子元件事业本部事业统括部 EV 模块技术部课长。工学博士。电气学会会员。

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。