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

Speed Enhancement for the 3rd-Generation Direct Liquid Cooling Power Modules for Automotive Applications with RC-IGBT

高下 卓马 KOGE, Takuma　　井上 大辅 INOUE, Daisuke　　安达 新一郎 ADACHI, Shinichiro

富士电机开发了搭载有薄型化 RC-IGBT（逆导型 IGBT），具备速度提升封装构造的车载用第 3 代直接水冷型模块。通过运用将 IGBT 和 FWD 单芯片化的 RC-IGBT，提升了开通时和关断时的开关速度。此外，通过 RC-IGBT 和内部布局的优化，寄生电感相比旧型封装降低了 50%。并且，通过采用三相分别设置 PN 端子对的封装结构，降低了重叠浪涌电压。通过上述技术，与第 2 代模块相比，第 3 代模块的开关损耗减少了 30%。

Fuji Electric has employed a thin reverse-conducting IGBT (RC-IGBT) in the development of a 3rd-generation direct liquid cooling module for automotive applications that is characterized by its high-speed packaging structure. By utilizing an RC-IGBT that integrates an IGBT and FWD on a single chip, the module achieves faster switching at turn-on and turn-off. In addition, parasitic inductance has been decreased by 50% compared with conventional packages through use of the RC-IGBT and internal layout optimization. Furthermore, superimposed surge voltage has been reduced by adopting a packaging structure that equips all 3 phases with a PN terminal pair. These technologies have enabled the 3rd-generation module to reduce switching loss by 30% compared with 2nd-generation modules.

1 引言

为防止全球气候变暖，CO_2 排放限制不断强化。在此背景下，使用引擎和马达两种动力源的混合动力汽车（HEV），以及仅依靠马达行驶的电动汽车（EV）已进入实用化时代，同时，开发工作仍在被积极推进，今后有望进一步得以普及。为了搭载在车内的有限空间，HEV 和 EV 的动力控制中使用的变频器不仅要进一步小型化，还需要支持高电力密度化要求，提高电池、马达的输出。

图 1 中展示了富士电机的 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）模块电力密度的趋势。工业用 IGBT 模块的最新一代产品，即第 7 代模块的电力密度为 300 kVA/L 左右。与此相比，车载用 IGBT 模块的最新一代产品，即第 3 代模块为 800 kVA/L 左右，高达工业用的约 2.5 倍。

富士电机为响应高电力密度化的要求，运用最新的薄晶片化技术，开发了薄型化、使 IGBT 和 FWD（Free Wheeling Diode）单芯片化的第 7 代 RC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT：逆导型 IGBT）[1],[2]。为减少变频器运行中产生的损耗，除了导通损耗，还必须减少开关损耗。

本稿将对为减少车载用第 3 代直接水冷型功率模块（车载用第 3 代模块）的损耗，通过应用薄型化的 RC-IGBT 技术和速度提升，减少了开关损耗的封装结构进行介绍。

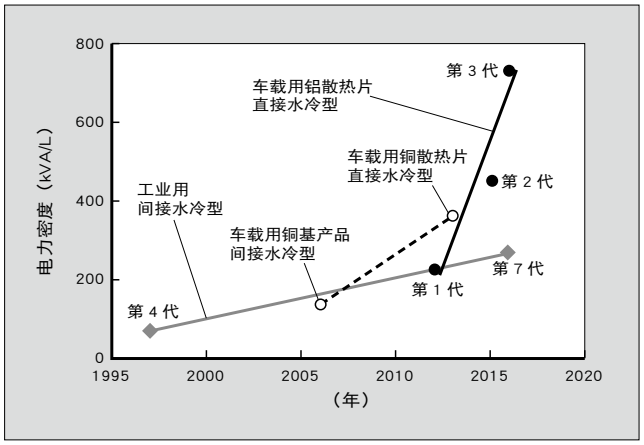


图 1　IGBT 模块的电力密度趋势

2 低电感封装设计

2.1 低电感化方面 RC-IGBT 的特点

图 2 展示了 RC-IGBT 的概要结构。HEV 用 RC-IGBT 以量产的电场终止（FS）型 RC-IGBT 为基础，条纹状地形成 IGBT 区域和 FWD 区域。凭借最新的薄晶片化技术减少了电力损耗，同时，对沟槽间隔、通道密度、接触层等的表面结构进行优化，从而提升了 RC-IGBT 的性能。**图 3** 展示了相同电流密度下，第 7 代 RC-IGBT 和旧型的第 6 代 IGBT、FWD 的输出特性。凭借薄晶片化技术和表面结构的优化，相比旧型的第 6 代 IGBT、FWD 的组合，$V_{CE\,(sat)}$ 和 V_F 大幅降低。

RC-IGBT 通过 IGBT 和 FWD 的单芯片化，实现了封装尺寸的小型化。第 7 代 RC-IGBT 能够以旧型芯片 70% 的尺寸，实现相同的输出电力。**图 4** 中展示了 RC-IGBT

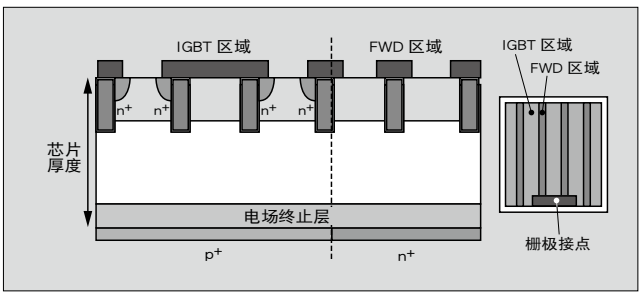


图 2　RC-IGBT 的概要结构

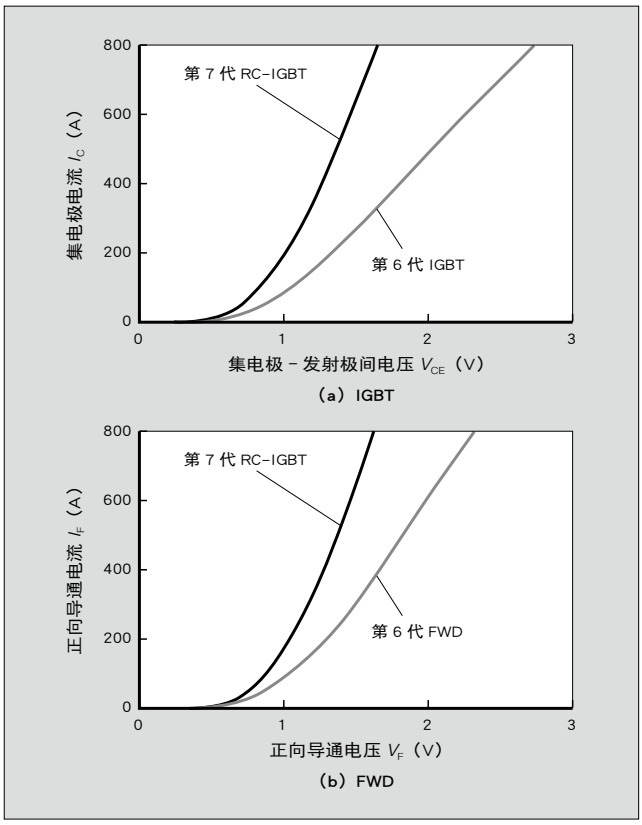


图 3　RC-IGBT 和旧型 IGBT、FWD 的输出特性

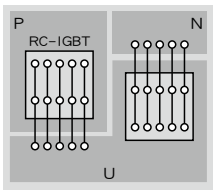
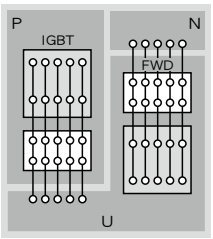
项目	第 7 代 RC-IGBT	第 6 代 IGBT、FWD
基板布局		
基板尺寸比	0.75	1
PN 间电流路径长度的比较	0.78	1

图 4　RC-IGBT 和旧型基板布局的比较

和一般的旧型半桥型电路的基板布局。RC-IGBT 的基板面积可减少至旧型的由 IGBT 和 FWD 构成的 IGBT 模块的 75%，P 端子到 N 端子的电流路径长度可缩短至 78%。

IGBT 模块的寄生电感，依赖于 P 端子到 N 端子的电流路径宽度和 PN 端子间的距离。若由 IGBT 和 FWD 构成 IGBT 模块，则电流路径长度是有极限的。因此，为减少寄生电感，通常会使用可扩大电流路径宽度的并联方式，或可缩短 PN 端子间距离的叠层母线排结构。但这些对策可能会导致封装尺寸增大[3]~[6]。RC-IGBT 的电流路径缩短，因此，可使寄生电感实现大幅降低，同时还能实现封装的小型化。

2．2　抑制重叠浪涌电压的封装设计

众所周知，封装的低电感化会使关断时和反向恢复时的浪涌电压降低。车载用第 3 代模块（6MBI800XV-075V）的寄生电感，通过运用第 7 代 RC-IGBT 和内部布局的优化，仅为搭载第 6 代 IGBT 和 FWD 的车载用第 2 代模块

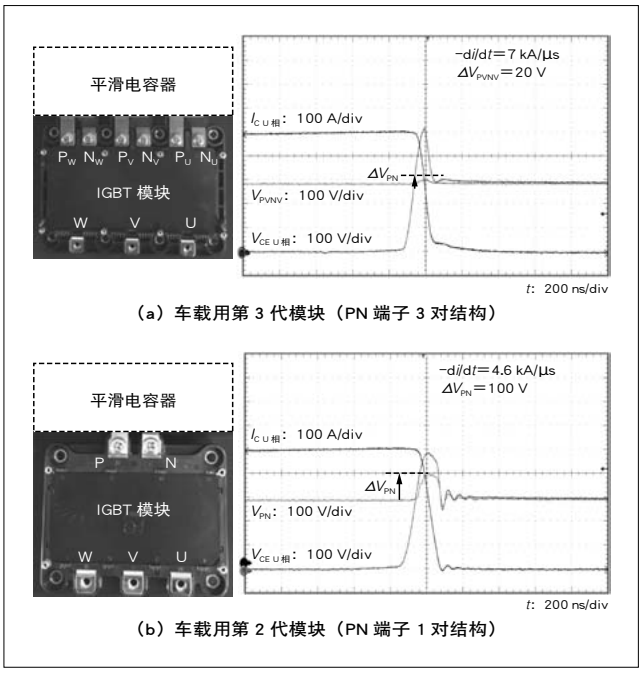


图 5　各代产品 PN 端子间的浪涌电压

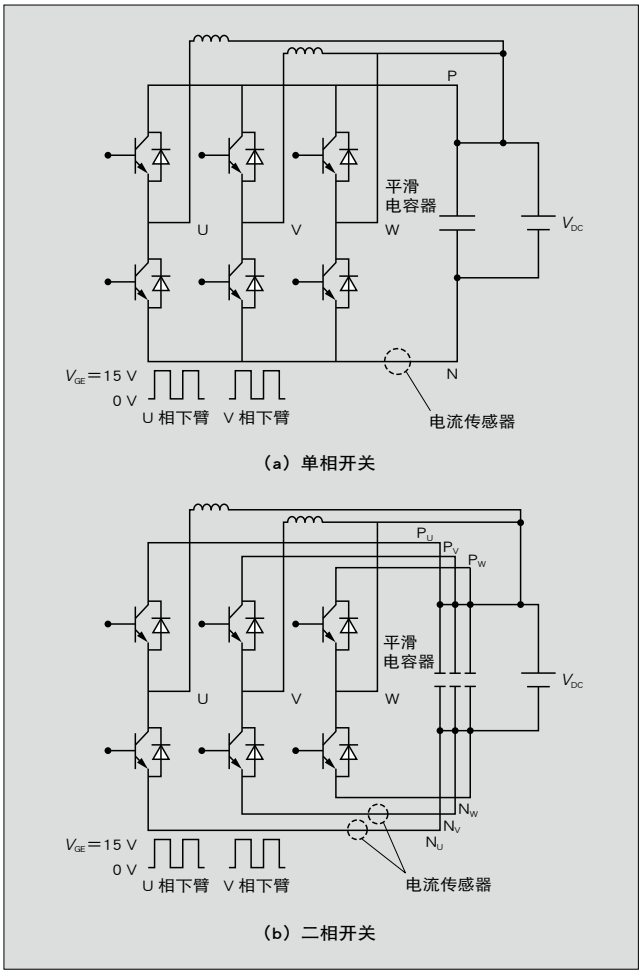


图 6　重叠浪涌电压测定的等效电路

（6MBI600VW-065V[7]）的二分之一左右。但除了寄生电感的降低，在变频器运行中，降低重叠浪涌电压也很重要。在连接了平滑电容器和模块的状态下，三相变频器的浪涌电压在关断动作时产生于模块的 PN 端子上。若关断动作发生在例如 U 相和其他相（V 相）间，P 端子和 N 端子间产生的浪涌电压便会重叠。

图 5 展示了各代产品 PN 端子间的浪涌电压。平滑电容器在汽车变频器中，以串联连接的状态使用。车载第 3 代模块的封装虽然开关速度（−d*i*/d*t*）是第 2 代模块的 1.5 倍，但 PN 端子间的浪涌电压有大幅降低。当各相的 PN 端子像车载用第 2 代模块的封装那样通用时，浪涌电压就很容易发生重叠。而车载用第 3 代模块的封装中，各相的 PN 端子是独立的，因此，PN 端子间的浪涌电压大幅降低。

为评估重叠浪涌电压，我们测定了二相开关时的浪涌电压。**图 6** 展示了二相开关时重叠浪涌电压测定的等效电路。

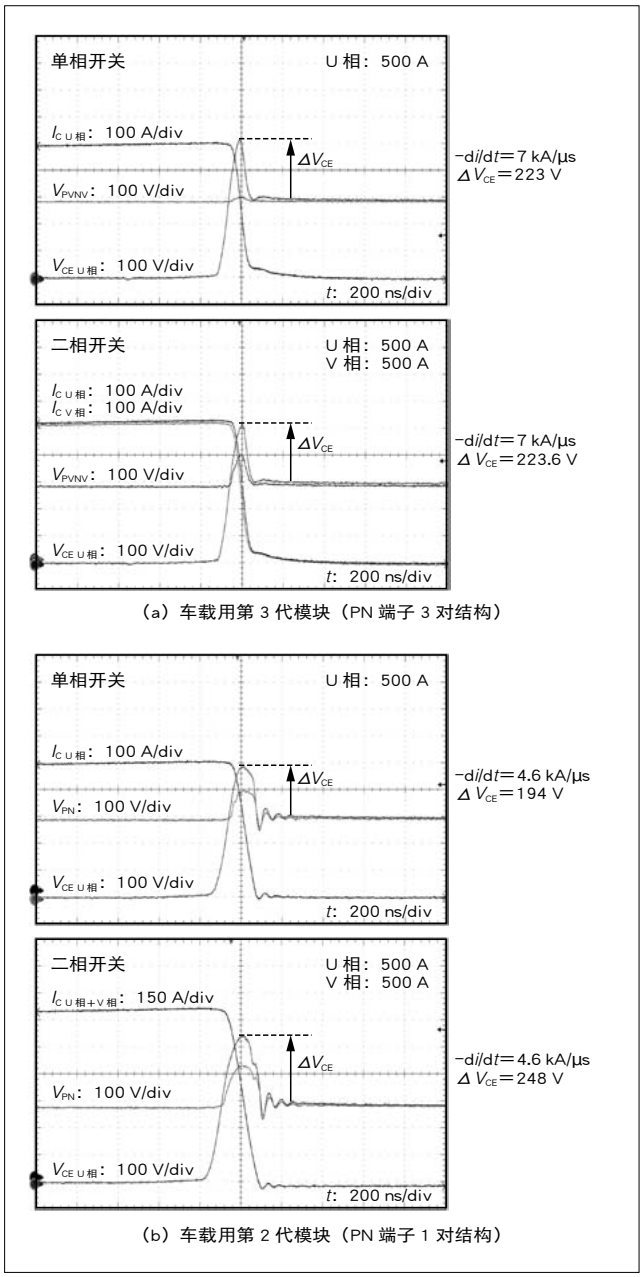


图 7　各代模块的关断波形

车载用第 2 代模块由于封装结构的限制，难以测定各相的电流。因此，测定的是二相整体的电流。**图 7** 展示了各代模块的关断波形。上方波形是仅 U 相单相开关时，下方波形是 U 相和 V 相二相开关时。车载用第 2 代模块，二相开关时的浪涌电压相比单相开关时，增加了 54 V。而车载用第 3 代模块，单相开关时和二相开关时几乎没有差别。并且，尽管车载用第 3 代模块的开关速度（−d*i*/d*t*）是第 2 代模块的 1.5 倍，但浪涌电压还是小于第 2 代模块。这一结果表明在相同电池电压和元件耐压的状态下，可将开关速度提升至车载用第 2 代模块的 1.5 倍以上。重叠浪涌电压在反向恢复动作时也同样会产生。因此，车载用第 3 代模块还能增加关断时的开关速度。

3　运用 RC-IGBT 模块的损耗特性

图 8 中展示了各代模块电力损耗的计算结果。这是在 V_{cc}=400 V，输出电力（有效值）400 A，开关频率 f_c=10 kHz 的条件下，变频器运行时，车载用第 2 代模块的电力损耗，和以 RC-IGBT 与 PN 端子 3 对结构的封装组合而成的、车载用 3 代模块的电力损耗的比较结果。以使包括重叠浪涌电压在内的浪涌电压相同为条件，设定了开通 d*i*/d*t* 和关断 −d*i*/d*t*。RC-IGBT 的尺寸，相当于 IGBT 和 FWD 组合起来的整体尺寸的 70%。通过提升开关速度，使开关损耗成功减少了 30%。

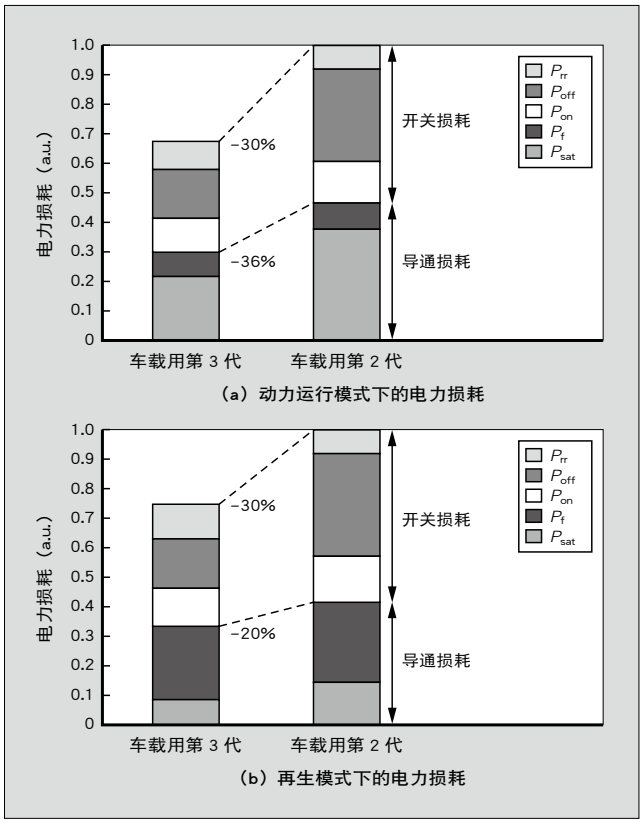


图 8　各代模块电力损耗的计算结果

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速度提升进行了介绍。

为提升反向恢复特性的柔软度，第 7 代 RC-IGBT 对表面结构和电场终止（FS）层进行了优化。通过运用这一 RC-IGBT，实现了开通时和关断时开关速度的提升。另外，车载用第 3 代直接水冷型功率模块的寄生电感，通过 RC-IGBT 和内部布局的优化，相比旧型封装降低了 50%。并且，通过采用三相分别设置 PN 端子对的封装结构，降低了重叠浪涌电压。

凭借这些技术，车载用第 3 代直接水冷型功率模块，相比第 2 代直接水冷型功率模块可减少开关损耗 30%，有望为实现高电力密度化的 HEV、EV 的变频系统做出重要贡献。

今后，富士电机将进一步提升设计技术，推进为实现小型化、高电力密度化作贡献的产品的开发。

参考文献

⑴ 野口晴司等. 轻度混合动力车用 RC-IGBT. 富士电机技报. 2015, vol.C7, no.1, p.16-19.

⑵ Higuchi, K. et al. “New standard 800A/750V IGBT module technology for Automotive applications”, PCIM Europe 2015, p.1137-1144.

⑶ C. Muller, S. Buschhom. “Power-module optimizations for fast switching a comprehensive study”, PCIM Europe 2015, p.434-441.

⑷ Kawase, D. et al. “High voltage module with low internal inductance for next chip generation-next High Power Density Dual”, PCIM Europe 2015, p.217-223.

⑸ G. Borghoff. “Implementation of low inductive strip line concept for symmetric switching in a new high power module”, PCIM Europe 2013, p.185-191.

⑹ R.Bayerer, D.Domes. “Power circuit design for clean switching”, CIPS2010.

⑺ Adachi, S. et al. “High thermal conductivity technology to realize high power density IGBT modules for electric and hybrid vehicles”, PCIM Europe 2012, p.1378-1384.

高下　卓马

从事车载用 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。

井上　大辅

从事 IGBT 模块的封装结构开发和设计。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封装安装开发部。

安达 新一郎

从事车载用 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 模块技术部组长。

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。