

技  
术  
专  
题

# 新型压接式 IGBT 模块的结构设计与特性分析

窦泽春, Rupert Stevens, 忻兰苑, 刘国友, 徐凝华

(株洲南车时代电气股份有限公司 功率半导体研发中心, 英国 林肯 LN6 3LF)



作者简介: 窦泽春(1985-), 男, 工程师, 主要从事功率半导体器件模块设计、器件应用以及变流技术相关工作。

**摘要:** 介绍了一种新型压接式绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, 简称 IGBT) 模块的内部结构设计, 分析其相对于传统 IGBT 模块的优势, 并通过静态和动态测试分析了其电气性能特点, 展示了其良好的特性以及广阔的应用范围。

**关键词:** 全压接; IGBT 模块; 结构设计; 特性分析

**中图分类号:** TN303; TN34      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-128X(2013)01-0010-04

## Design and Characteristic Analysis of Novel Press-Contact IGBT Module

DOU Ze-chun, Rupert Stevens, XIN Lan-yuan, LIU Guo-you, XU Ning-hua

(Power Semiconductor R&D Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Lincoln, LN6 3LF, United Kingdom)

**Abstract:** Design of a novel pressure-contact IGBT module was stated. The advantages with respect to conventional IGBT modules were compared as well. The characteristics determined by static and dynamic tests demonstrated good performance and wide suitability for popular applications.

**Key words:** press pack; IGBT module; structure design; characteristic analysis

### 0 引言

IGBT 是 MOSFET 和双极晶体管的复合器件, 它既有 MOSFET 易驱动的特点, 又具有功率晶体管高电压、大电流等优点, 目前正被广泛地应用于电力输变送、高速列车牵引、工业驱动、清洁能源等诸多领域。

本文介绍了一种新型压接式 IGBT 模块, 它具有双面散热、更宽广的安全工作区 (SOA)、更高的工作结温、无焊层、无引线键合、高可靠性等特点, 尤其是失效短路 (Fail-to-Short) 的特殊特性, 使其相比于 BJT 晶闸管以及传统的引线键合/焊接式 IGBT 模块而言, 在柔性直流输电换流阀中的器件直接串联、苛刻应用环境和高可靠性要求的铁路机车主变流器等应用领域中具有非常显著的竞争优势。

### 1 全压接式结构设计

压接式 IGBT 模块的结构设计与晶闸管、GTO、IGCT 等常规功率器件类似, 外部采用陶瓷管壳封装, 内部采用一种新型的独立子模组单元设计。图 1 为一款额定

电压 4.5 kV, 额定电流 1 200 A 的单开关压接式 IGBT 模块的内部结构图。该模块含有 37 个独立子模组单元 (包括 IGBT 子模组和 FRD 子模组, 并按特定的比例和方式分布), 每一块 IGBT 和 FRD 芯片都安装在自己独立的塑料底座里, 并通过上下钼片分别与集电极和发射极管壳电极直接压力接触连接, 如图 2 所示。栅极也像集电极和发射极一样通过压力单独连接, 不需要焊接或者引线键合, 而是通过安装在塑料模座上的独立弹簧针连接, 这些弹簧针又汇总到一块 PCB 电路板上并连接到外部栅极端子上。

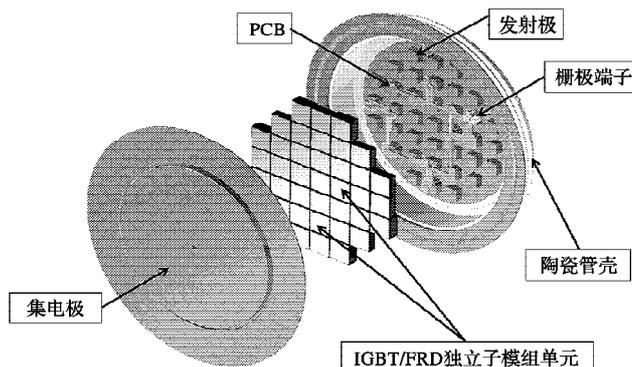


图 1 压接式 IGBT 模块内部结构图

收稿日期: 2012-11-20

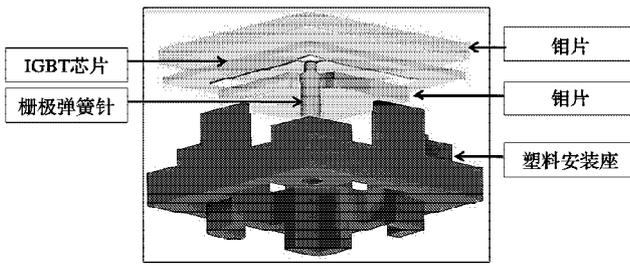


图 2 IGBT 子模组单元结构图

这种独一无二的独立子模组单元的设计不仅避免了焊接或引线键合的可靠性问题,而且也给单独装配与测试带来了极大的便利,同时任何一个 IGBT 子模组单元都可以被替换成 FRD 二极管子模组单元实现反向导通,可以实现对特殊应用需求的定制化设计。

传统型 IGBT 模块采用引线键合和焊接等连接方式将半导体芯片与陶瓷基板和散热底板以及 BUSBAR 等部件封装在一起,如图 3 所示<sup>[1]</sup>。所以与传统 IGBT 模块相比,压接式 IGBT 模块在性能以及可靠性等方面具有多种优势。

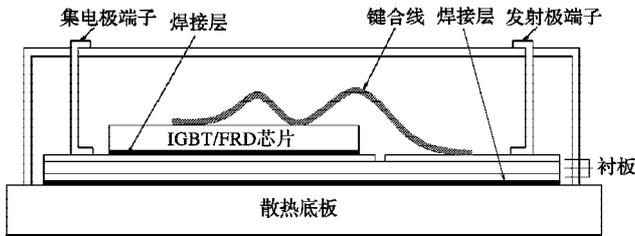


图 3 典型的传统 IGBT 模块内部结构示意图

### 1.1 低电感设计

压接式 IGBT 模块的这种内部结构设计带来了极低的内部电感,等效电路图如图 4 所示。同时 IGBT 芯片的栅极全部通过弹簧针分别连接到一块栅极电路板上,这种栅极连接设计的杂散电感极低,保证了每个芯片由  $di/dt$  引起过压的一致性,为器件的高速开通带来可能,与传统模块内部的复杂引线连接而造成的复杂电感分布相比具有很大的优势。

传统 IGBT 模块的内部等效电路如图 5 所示。由于内部的 BUSBAR 和引线连接,内部电感包括终端电感  $L_T$ 、发射极 BUSBAR 电感  $L_E$ 、发射极引线电感  $L_{BW}$ 、集电极 BUSBAR 电感  $L_C$  等,如此复杂的电感分布不仅带来了模块总电感的增加,同时也带来了芯片之间电感分布的差异性。

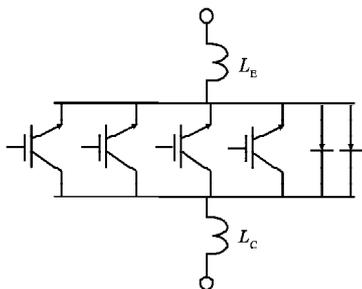


图 4 压接式 IGBT 模块内部电感分布

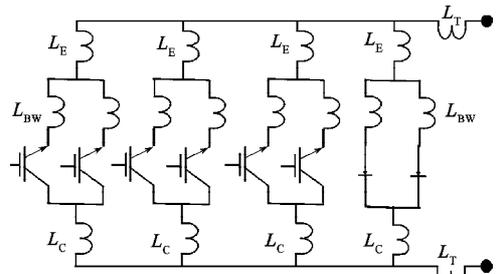


图 5 传统 IGBT 模块内部电感分布

### 1.2 低热阻设计

这种集电极和发射极直接压力接触连接的模块设计方式可以方便地在模块上下两面安装散热器,从而实现双面散热,如图 6 所示。而传统 IGBT 模块只能底板安装散热器进行单面散热,见图 7。仿真研究报告分析得出,同等功率等级的压接式 IGBT 模块的热传导特性比传统模块大为提高<sup>[2]</sup>。

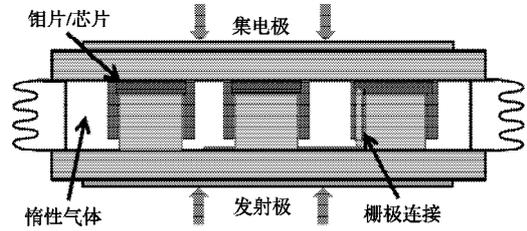


图 6 双面散热

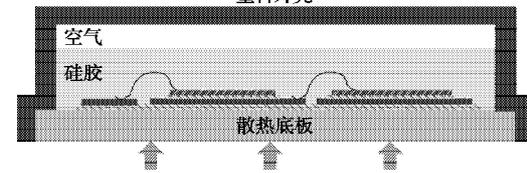


图 7 单面散热

### 1.3 特殊的失效短路模式

在高压直流输电 (HVDC) 等系统应用中,有时需要十几甚至几十只压接式 IGBT 模块串联连接来支撑最高达几百千伏的直流电压。为了防止其中一只模块失效而引起整个系统的中断,通常在系统中设计有冗余模块。当其中一个压接式 IGBT 模块发生失效时,瞬间形成的高能量使硅芯片和与其接触的金属形成稳定的合金,构成短路电流的稳定通路。为了验证压接式 IGBT 模块失效短路点的长期可靠性,试验研究得出<sup>[3]</sup>: 在一个负载电流高达 1 500 A 的实际 HVDC 或 SVC 应用系统中,失效短路模块可以维持至少 1 年。这就意味着在一个包括 6 000 只左右的 IGBT 模块的典型 HVDC 系统中,其正常检修周期一般为 1 年,在这期间即使有模块失效发生,系统也可以无间断运行,有效地避免了不可预测的电力系统异常中断。

与传统 IGBT 模块的失效开路特性相比,压接式 IGBT 模块的这种独一无二的失效短路特性可在多模块串联应用,特别是 HVDC 系统中提供器件的冗余备份功能,使它们成为了一种理想的串联应用的器件。

### 1.4 可靠性增强

传统 IGBT 模块内部采用引线键合、焊接等连接方

式,其3个常见失效点<sup>[1,4]</sup>分别是:引线键合点失效、硅芯片与衬板焊层失效、衬板与底板焊层失效。其中最常见的是引线脱落,其主要原因是温度变化时硅和铝材料的热膨胀系数(CTE)不匹配。焊层疲劳是焊接失效的主要原因,这种情况在衬板与底板之间比硅芯片与衬板之间更加严重,因为衬板与底板的热膨胀系数的不匹配程度比硅芯片与衬板之间要严重很多。当焊层开始疲劳失效时,传导能力下降,加速老化,最终热效应失效。其他的失效机理如引线倾斜、铝材料退化、硅芯片磨损等一般都是在长时间功率循环之后才会出现。

而压接式IGBT模块内部通过压力直接连接,没有引线键合和焊层,消除了传统模块的关键失效点,大大提高了模块的性能和可靠性。同时压接式IGBT模块可以双面散热,降低了热阻,增加了功率密度,提高了模块在更苛刻应用环境下的长期可靠性<sup>[5]</sup>。图8显示了典型的压接式和传统IGBT模块温度循环试验对比分析结果,压接式IGBT模块的可靠性明显优于传统模块。

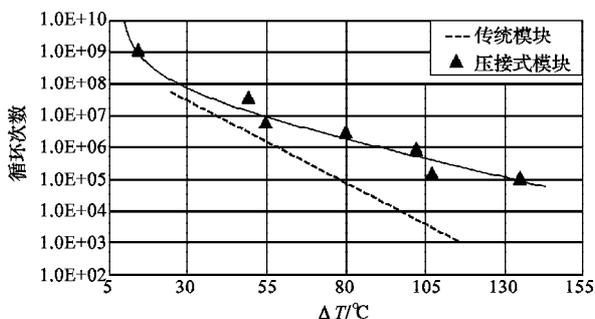


图8 温度循环次数与 $\Delta T$ 关系曲线

## 2 电气特性分析

作为典型的高开关频率功率器件,压接式IGBT模块也必须同时从静态和动态2个方面进行特性分析。下面将以4.5 kV/1 200 A压接式IGBT模块为例进行特性测试分析。

### 2.1 静态特性

图9为25℃和125℃结温条件下,模块的正向电压 $V_{ce}$ -集电极电流 $I_c$ 的特性,以及对应10~20 V栅极电压 $V_{ge}$ 的不同特性。在额定集电极电流 $I_c = 1\ 200\ A$ 的条件下,对应推荐栅极电压 $V_{ge} = 15\ V$ 时,模块的正向导通电压 $V_{ce}$ 为2.7 V(温度25℃时)和3.5 V(温度125℃时)。

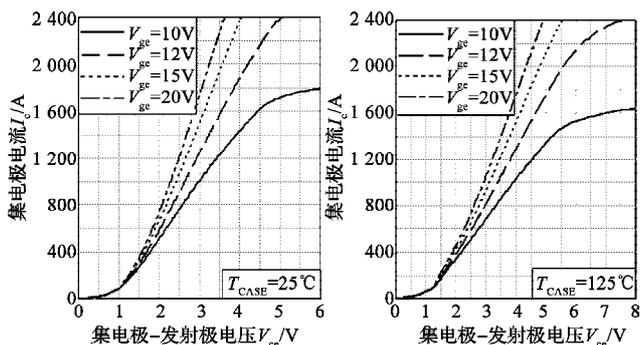


图9 25℃和125℃结温下正向电压特性

### 2.2 动态特性

使用典型的双脉冲测试法测试模块的动态特性,测试电路原理图如图10所示。相桥臂的下管 $T_n$ 是被测IGBT, $D_n$ 是其内部反并联FRD二极管,桥臂上管仅由陪试二极管 $D_p$ 组成, $L$ 是负载电感。

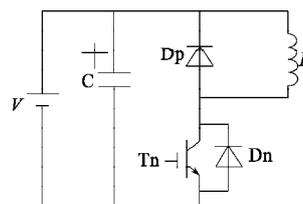


图10 动态测试原理图

测试电路的工作原理是:被测模块 $T_n$ 触发导通,电流按照 $V_c/L$ 的斜率上升,其中 $V_c$ 是电容电压。当达到预期电流 $I_c$ 时,模块将被关断,然后电感上的电流通过陪试二极管 $D_p$ 进行续流。在短暂的间隔之后,测试模块再次导通,在第二次开通的瞬间,电感上的电流流经被测元件 $T_n$ ,同时陪试二极管 $D_p$ 的反向恢复电流也流经 $T_n$ 。在 $T_n$ 的第二次开通周期内,电流将会以 $V_c/L$ 的斜率再次上升直至被关断。关断时, $T_n$ 上的电压会因为存储在 $L$ 中能量的释放以及线路杂散电感等因素的影响而出现电压过冲。

测试前模块和设备都被加热到125℃,调整脉宽,使第一次关断时集电极电流 $I_c$ 为额定值,第二次关断时 $I_c$ 为2倍额定值。为保险起见,脉宽调整在低压下进行,2个脉冲之间要有一定的时间延迟来保证IGBT可靠关断。

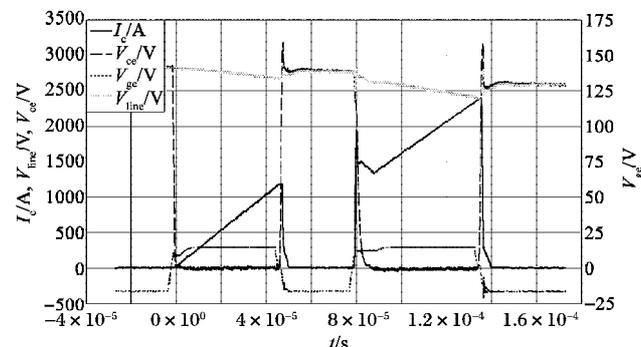


图11 温度125℃时的RBSOA波形

图11显示了典型的压接式IGBT模块的RBSOA特性,测试条件为:温度 $T = 125\ ^\circ C$ ,开通电阻 $R_{g\ on} = 3.3\ \Omega$ ,关断电阻 $R_{g\ off} = 3.3\ \Omega$ ,栅极电压 $V_{ge} = \pm 15\ V$ ,直流电压 $V_{line} = 2\ 800\ V$ 。第一次关断电流 $I_c = 1\ 199\ A$ ,电流上升率 $di/dt = 2\ 638\ A/\mu s$ ,第一次关断电压尖峰 $V_{ce} = 3\ 131\ V$ (包含电路中杂散电感 $L_s$ 存储能量);第二次关断电流 $I_c = 2\ 400\ A$ ,为额定集电极电流的2倍。总开通和关断损耗分别是 $E_{on} = 6.0\ J$ 和 $E_{off} = 4.5\ J$ 。

测试模块的短路安全工作区SCSOA特性,使用图10所示的动态测试电路,将负载 $L$ 更换成一段导线来模拟负载短路的工况。

图12为典型的模块SCSOA测试波形,测试条件为:温度 $T = 125\ ^\circ C$ ,直流电压 $V_{line} = 3\ 400\ V$ ,开通电阻 $R_{g\ on} = 2.2\ \Omega$ ,关断电阻 $R_{g\ off} = 2.7\ \Omega$ ,栅极正向电压 $V_{ge} = 15\ V$ ,导通持

续时间  $T_{on}=10\ \mu\text{s}$  左右。短路集电极电流  $I_c=5\ 217\ \text{A}$ , 约为额定集电极电流的 4.35 倍。而在直流电压  $V_{line}$  不超过 3 000 V 的测试条件下, 短路安全工作区电流  $I_c$  最高可达额定集电极电流的 5 倍以上。

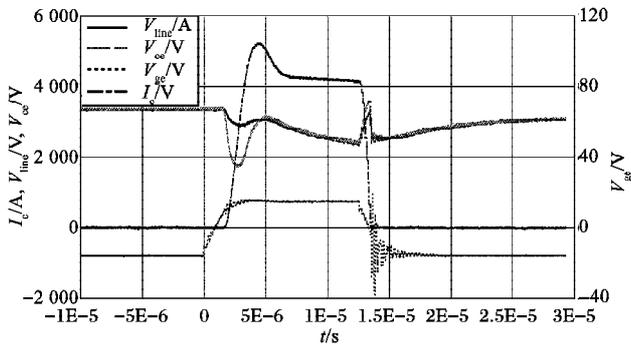


图 12 温度 125 °C 时 SCSOA 波形

表 1 压接式模块与传统模块特性参数比较

模块型号	$V_{ces}/\text{V}$	$I_c/\text{A}$	$V_{ce\ on}/\text{V}$	$R_{g\ on}/\Omega$	$R_{g\ off}/\Omega$	$V_{line}/\text{V}$	$t_{d\ on}/\mu\text{s}$	$t_f/\mu\text{s}$	$E_{on}/\text{J}$	$t_{d\ off}/\mu\text{s}$	$t_r/\mu\text{s}$	$E_{off}/\text{J}$
4.5kV/1200A 压接式模块	4 500	1 200	2.7	2.2	2.7	2 800	0.90	0.35	4.70	3	0.6	4.20
5SNA1200G450300(ABB)	4 500	1 200	2.6	1.5	1.5	2 800	0.74	0.21	3.08	2.28	0.6	4.96
CM1200HC-90H (三菱)	4 500	1 200	3.5	2.7	2.2	2 800	1	0.30	4.25	6.25	0.4	3.90

件下安全工作。同时电气特性测试结果也显示了其良好的电气性能, 可以广泛地应用于传统 IGBT 模块的应用领域, 另外其苛刻应用环境下的长期可靠性特性使其特别适用于大功率电力机车牵引<sup>[6]</sup>、大型工业装备驱动等领域。

压接式 IGBT 模块的另一个显著的特点是失效短路模式时, 可以在大型高压系统中提供冗余备份功能, 并使其成为一种理想的串联应用器件。在包括高压直流输电系统 (HVDC)、静止式无功补偿 (SVC) 系统<sup>[3]</sup>、多个器件直接串联的多电平变流器以及输出电压 6.9 kV 及以上的中压驱动变流器系统中, 都有极好的应用前景。

同时由于它有与其他基于晶闸管压接技术的结构兼容性, 压接式 IGBT 模块提供了一个不需要改变机械设计而升级现有系统的应用机会, 仅需要更换现有的门极驱动单元就可以同时用作翻新现有系统或基于现有机械结构的新设计。

#### 4 结语

本文提出了一种新型的压接式 IGBT 模块结构, 采用新型的子模组单元通过压力直接连接封装。其结构简单, 不仅易于装配与单元测试, 而且消除了引线键

表 1 中列举了常见的两款同等功率等级的传统 IGBT 模块的参数, 并与压接式 IGBT 模块进行了比较。其中 5SNA1200J450300 为 ABB 公司的 IGBT 模块产品, CM1200HC-90H 为三菱公司的 IGBT 模块产品, 两款模块额定电压和额定电流都与压接式 IGBT 模块一致。表中数据均为 25 °C 时的结果, 数据比较可见, 压接式 IGBT 模块的电气特性已经基本达到且部分已经超越同类主流传统 IGBT 模块。

#### 3 应用前景分析

相比较于传统的引线键合/焊接式 IGBT 模块, 压接式 IGBT 模块具有以下优点: 直接压力连接去除了易失效点, 提高了可靠性; 内部布置低电感及芯片之间的电感分布一致; 双面散热降低了热阻; 可在高结温条

合点、焊层可靠性低等问题。同时其优秀的低电感特性、双面散热低热阻特性以及失效短路的模式使其不仅可以应用于传统 IGBT 模块的应用领域, 而且还成为了一种理想的串联应用器件。通过模块的动静态测试分析其电气特性, 证实相比于市场主流同功率等级传统产品, 其特性参数已经达到且部分已经超越它们。

#### 参考文献:

- [1] Hua Ye, Minghui Lin. Failure modes and FEM analysis of power electronic packaging[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2002, 38: 601-612.
- [2] Pironi A, Nicoletto G. Thermo-mechanical finite element analysis in press-packed IGBT design[J]. Microelectronics Reliability, 2000, 40: 1163-1172.
- [3] Simon Eicher, Munaf Rahimo. 4.5kV Press Pack IGBT Designed for Ruggedness and Reliability[C]. Seattle, USA: ISA, 2004, 1534-1539.
- [4] Busca C, Teodorescu R. An overview of the reliability prediction related aspects of high power IGBTs in wind power applications[J]. Microelectronics Reliability, 2011, 51, 1903-1907.
- [5] Poller T, Basler T. Mechanical analysis of press-pack IGBTs [J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52, 2397-2402.
- [6] Golland A, Wakeman F. Application of Press-pack IGBTs in Traction Refurbishment[C]. Austin, Texas, USA: APEC 2005, 2005: 2030-2035.

