

主功率端子压接技术在 IGBT 模块高集成设计中的应用研究

袁 勇^{1,2}, 熊 辉^{1,2}, 黄 南^{1,2}, 陈燕平^{1,2}, 忻 力³

(1. 新型功率半导体器件国家重点实验室, 湖南 株洲 412001;

2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001; 3. 中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 文章简要阐述了压接式 IGBT 模块封装技术原理。为了实现 IGBT 模块的高度集成, 对主功率端子压接工艺对模块阻抗特性、模块并联应用及热性能的影响进行了研究, 提出一种 IGBT 模块主功率端子与衬板压接载流设计方案并介绍了其关键技术。仿真与实验结果验证了主功率端子压接技术在 IGBT 模块产品开发及应用中的有效性。

关键词: IGBT 模块; 压接; 阻抗分布; 参数一致性; 热性能

中图分类号: TN32

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)01-0039-06

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.01.008

Research on Pressure-contact Technology of Power Terminals for the Design of High-integration IGBT Module

YUAN Yong^{1,2}, XIONG Hui^{1,2}, HUANG Nan^{1,2}, CHEN Yanping^{1,2}, XIN Li³

(1.State Key Laboratory of Advanced Power Semiconductor Devices, Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

3. CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It briefly introduced the package principle of pressure-contact IGBT devices. In order to achieve high-integration of IGBT module, the effect of pressure-contact technology on its impedance characteristic, parallel application and thermal performance was studied. A design scheme of press-contact IGBT device with elastic main power terminals was proposed and its key technology was described. Simulation and experimental results verified the efficiency of press-contact technology in IGBT module design and engineering application.

Keywords: IGBT module; pressure-contact; impedance distribution; parameter consistency; thermal performance

0 引言

IGBT 装置的高功率密度与高可靠性是业内持续追求的目标, 相应 IGBT 模块单元在集成化、轻量小型化、标准化、智能化等特征方面备受瞩目, 而新型材料技术及先进半导体封装技术的发展为 IGBT 模块的高集成设计与制造提供了可能^[1-2]。在同等功率半导体芯片技术水平条件下, 芯片外围电路的功率互连、电气接口及散热是影响 IGBT 模块集成度、轻量小型化及标准化的关

键因素, 也可据此将 IGBT 模块封装技术分为焊接型与压接式两种。焊接型封装, 模块主功率端子通过焊接技术与衬板相连从而实现导流; 压接式封装, 主功率端子集受力与受电为一体, 通过压接技术与衬板相连, 是规避主功率端子焊接应力及长期应用中功率循环退化难题的一种有效解决方案。文献 [1-5] 在功率半导体集成技术方面开展了探索性工作。本文以 IGBT 模块集成封装设计中的主功率端子与衬板压接互连为研究对象, 分析了压接对 IGBT 模块阻抗特性、换流与并联使用及热性能的影响, 研究结果对掌握主功率端子与衬板压接的技术机理及产品开发具有一定的指导意义。

收稿日期: 2016-11-10

作者简介: 袁勇 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事集成式功率半导体组件的开发及应用技术研究工作。

1 压接技术原理及问题阐述

IGBT 模块内部一般采用半桥电路结构（图 1），由 2 块衬板并联桥接而成。这样既有利于在同一封装内集中解决上、下管特性差异及电磁热交互问题，也易于构建并联或级联扩容使用的标准化功率单元。压接式 IGBT 集成结构如图 2 所示，采用了三明治堆叠式主功率端子，在外围部件的施压作用下，主功率端子通过其弹性引脚触通连接 IGBT 各电极，衬板受压后可直接安装于涂覆有热界面材料的散热器上。其特点在于主功率端子采用压接方式连接且无基板，在规避主功率端子与衬板焊接热膨胀失配问题与降低热阻方面优势较明显。

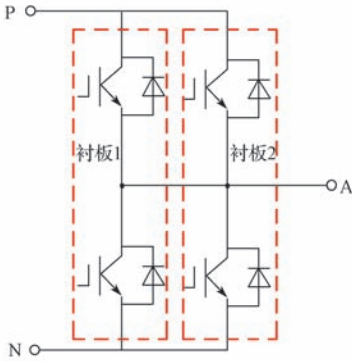


图 1 主电路
Fig.1 Topology of main circuit

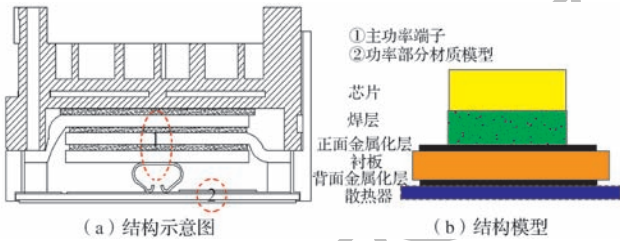


图 2 压接式 IGBT 结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of pressure-contact IGBT

表 1 归纳了压接式 IGBT 模块与焊接式 IGBT 模块的主要特性区别。可以看出，主功率端子压力均衡是保证压接式 IGBT 模块功能与性能的关键^[4]，需特别关

表 1 IGBT 模块主功率端子压接衬板载流与普通焊接方案技术特性对比

Tab. 1 Characteristics comparison between pressure-contact IGBT and common IGBT

	电气特性	热学特性	机械特性	使用特性
压接式 IGBT	弹性连接导电，接触电阻波动	免基板，热阻低，但热量横向扩展能力差；主功率端子与衬板之间无热膨胀失配	振动对连接有一定影响	易于最小系统的构建；可采用直接更换衬板的方式安装维护
		功率端子连接牢固，载流能力强，但高频开关易疲劳及退化失效	含基板，热阻高，热的横向扩展及均温能力强，但长期使用易热应力集中	成品率限制了单个模块大容量的扩展，更换维护成本相对高

注端子压缩量对电气回路阻抗特性的影响、压力一致性对模块并联应用的影响以及压力分布对模块热性能的影响。

2 端子压接力对模块阻抗特性的影响

压接是解决主功率端子与衬板焊接热应力的有效方案，但主功率端子与衬板间的接触电阻随机械压力的大小而变化，进而影响模块阻抗特性甚至电气性能。

为研究压接对模块阻抗特性的影响，根据图 1 和图 2 示出的主电路集成设计方案，得到仅考虑电阻分布的等效电路模型（图 3）。图 3 中， R_p 、 R_n 、 R_1 和 R_3 为直流功率端子寄生电阻； R_a 和 R_2 为交流功率端子寄生电阻； R_f 为引线杂散电阻； R_g 为 IGBT 芯片导通等值电阻； R_t 为 FRD 芯片导通等值电阻。

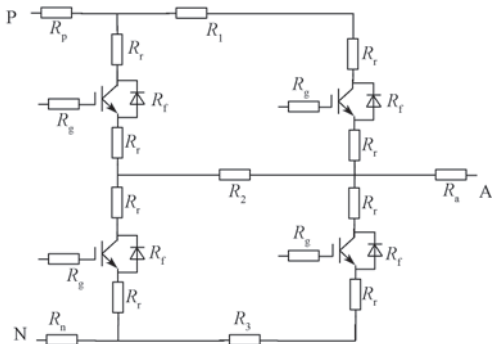
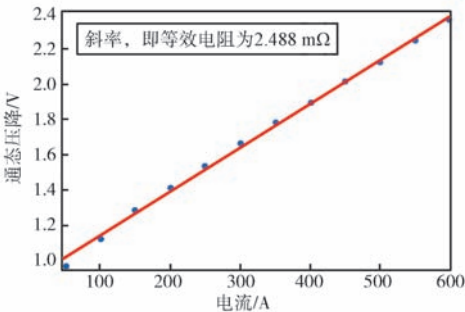


图 3 等效电路模型
Fig.3 Equivalent circuit model

考虑 IGBT 与 FRD 通态时存在等值开关电阻，而主功率端子压接引起的接触电阻为非固定值，本文采用通流测试与线路杂散参数仿真的方法对图 3 所示模型进行参数辨识提取。图 4 为各桥臂在额定电流范围内正向特性的实测曲线。可以看出，各曲线的正向线性相关性强，其斜率即为通态时对应回路的等效总电阻（包括芯片导通等效电阻、线路电阻和接触电阻）。结合线路杂散参数仿真（图 5），辨识得到图 3 中 IGBT 模块电路模型在预设额定 0.6 mm 主功率端子压缩量条件下的阻抗分布情况（表 2）。



(a) “P-A”回路（上管 IGBT 通路）

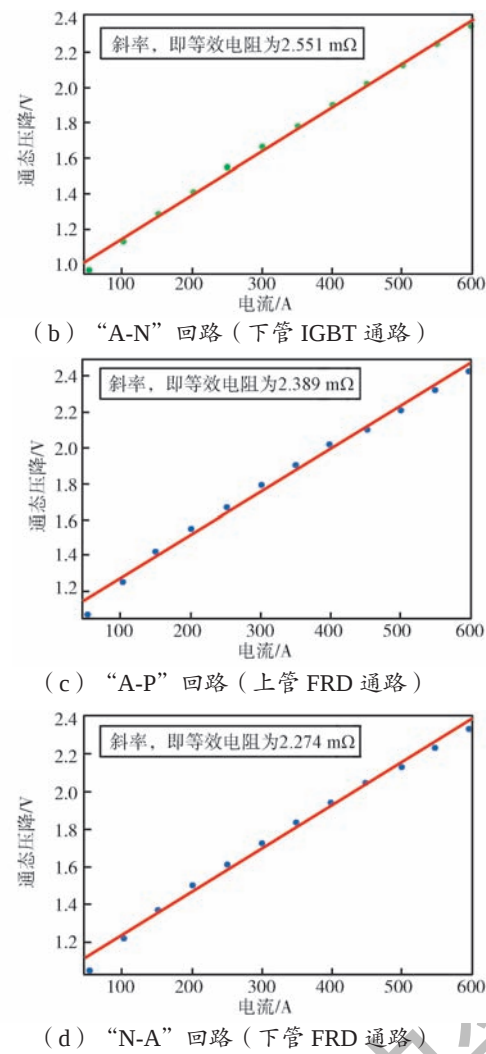


图4 各桥臂正向特性曲线
Fig. 4 Forward characteristics of IGBT bridge

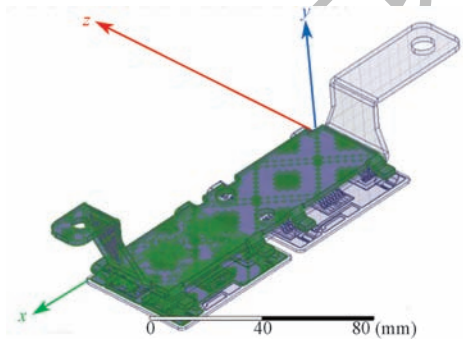


图5 线路杂散参数仿真
Fig. 5 Simulation of parasitic parameters

表2 IGBT模块阻抗分布
Tab. 2 Distributions of IGBT module impedance

参数	“P-A”回路	“A-N”回路	“A-P”回路	“N-A”回路
等效总电阻/mΩ	2.488	2.551	2.389	2.274
芯片导通				
等值电阻/mΩ	4.7	4.7	4.45	4.45
线路电阻/mΩ	0.168	0.164	0.168	0.164
接触电阻/mΩ	0.013	0.014	0.013	0.014
接触电阻与线路电阻比值	7.74%	8.54%	7.74%	8.54%

由表2可知，IGBT模块的主功率端子弹性压接方案可将上管与下管IGBT之间、上管与下管FRD之间的线路阻抗差异均控制在0.1 mΩ左右，对应额定通流压降差异不超过0.1 V，说明含接触电阻在内的模块阻抗特性符合上、下管对称的常态设计要求。此外，因主功率端子弹性压接诱导的接触电阻在整个线路阻抗中所占比例约8%，可视为对换取耐久性弹性触通连接的一种参数补偿。

为研究接触电阻对导电特性的影响，采用主功率端子垂直压缩量表征其压接力大小，按照图4和图5示出的电气网络阻抗参数辨识方法测量各压缩量下的接触电阻变化情况，得到表3所示的样本数据。显然，随着主功率端子压缩量的减少或实际应用中功率端子的老化回弹，接触电阻逐渐变大，弹性接触效果有所衰退。

表3 接触电阻变化特性

Tab. 3 Characteristic of contact resistance vs pressure

主功率端子垂直压缩量/mm	接触电阻增量/mΩ	相对线路电阻占比
0.6	0	0
0.525	+5.594E-3	0.2%
0.35	+0.101	3.5%
0.175	+0.173	5.96%
0.005	+0.179	6.2%

图6为表3数据的高次多项式深度拟合曲线。可以看出，若给定目标设计的压缩量为0.6 mm，则接触电阻在0.16 mm~0.53 mm主功率端子压缩行程内变化较明显，最大增量幅值达线路总电阻的6.2%；在0.53 mm~0.6 mm及0~0.16 mm这两个区段内，接触电阻变化很小，几乎接近“钝化”现象。若放在振动工况中，则说明模块在压紧状态具备0.07 mm左右振动不敏感地带，在该地带内回路阻抗特性与电气性能几乎不受影响；同样地，可认为有0.16 mm的裕量用于主功率端子在接近脱离电接触状态保持回路阻抗特性与电气性能不发生跳变，这于应用而言是有利的。

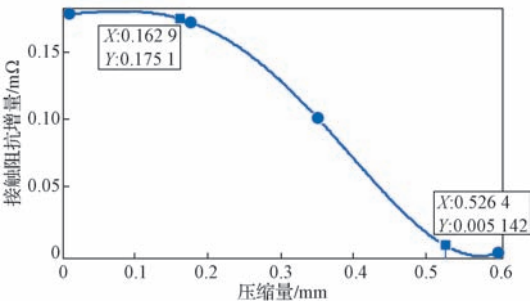


图6 接触电阻变化曲线
Fig. 6 Curve of contact resistance vs pressure

3 压力一致性对并联应用的影响

对于同一模块而言，如果上、下管所受压力差异

大,则参数失调容易诱发换流障碍,而在实际应用中则往往按参数失调最严重的工况进行驱动配置,如此限制了 IGBT 功率的发挥。同样地,当压力一致性在不同模块之间表现欠佳时,并联使用时需更多地考虑降额系数,而系统集成及容量配置则受到约束。

压力的不一致会造成模块内部上、下管参数失调而引发功耗的非对称及温升的单向集中。压力一致性对应应用的影响,可以从半桥模块的上、下管参数差异性及模块间并联应用效果两方面衡量。随机抽取 3 批模块,逐一测量每批模块 (≥ 10 只) 在不同电流值下的上管通态压降与下管通态压降的最大差异,得到图 7 所示的 3 组样本数据。由图 7 可以看出,上管与下管的通态压降差值均有效控制 在 50 mV 范围内,避免了压力不一致给上下管参数一致性可能带来的潜在影响。

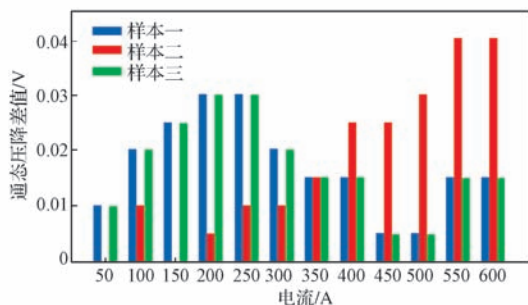


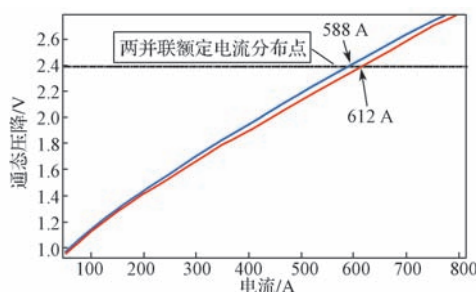
图 7 模块内上、下管参数差异

Fig. 7 Parameter difference between upper and down devices in module

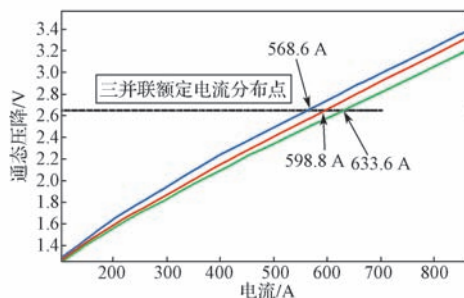
压力的一致性将影响模块间并联使用效果。研究表明,微小的线路等值电阻差异都将引起均流的巨大变化差异^[6]。已知 n 组模块并联,给定不均流系数 x ,则使用的降额系数 $(1-y)$ 计算公式为^[7]

$$y = \frac{1+x+(n-1)(1-x)}{n(1+x)} \quad (1)$$

以两并联和三并联为例,设定单个 IGBT 模块的额定电流为 600 A,图 8 示出模块并联时电流分布情况,结合式 (1),计算得到不同并联条件下不均流特性随电流使用的变化情况 (图 9)。显然,模块并联数量越多,不均流系数也越大,则需更多地考虑降额设计问题。由图 9 可知,在 1/2 额定电流使用容量内,不均流性随电流使用的扩大而恶化,三并联最大发挥至 1/2 额定电流容量时的不均流系数最大 (为 10.5%),此时需降额 12.7% 才能使模块处于安全工作范围内;而超 1/2 额定电流容量使用或长时间处于通流条件下,通过主功率端子的合理压接散热,可使模块利用自身温度系数的调节作用达到更好的并联使用效果。



(a) 两并联



(b) 三并联

图 8 并联 IGBT 模块电流分布

Fig. 8 Output current distribution of IGBTs in parallel

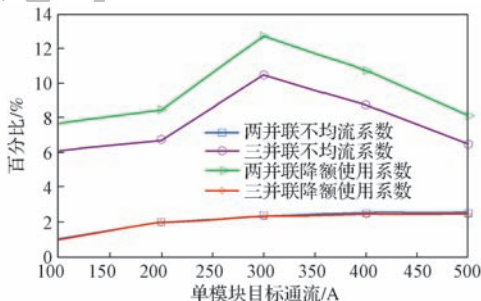


图 9 IGBT 并联特性随电流的变化

Fig. 9 Characteristics of IGBTs in parallel varied with current

4 压力分布对热性能的影响

为实现衬板与散热器之间良好的物理接触,在二者的间隙填充导热材料。由于失去基板大尺寸横向扩展热阻的辅助散热功能,功率耗散的垂传播效应增强,须使衬板均匀受压以防止因热流路径恶化而引发的热量局部积聚及芯片电过载^[8]。

实践表明,高效的散热应该是热阻与热容之间存在良性匹配关系,因追求低热阻而过分削弱热容的热量缓冲层作用将容易引发散热失衡及局部过温。普通焊接型 IGBT 模块由于基板的存在,使热量具备较好的横向扩展能力,为温度耦合营造了条件^[9-10]。基于此,主功率端子压接式 IGBT 模块因失去基板而使功耗的传递更加倚赖垂直方向,从而表现出对压接力分布的均匀性比较敏感,由于压力不均致使传热失衡的潜在可能性增大。参照热路实体模型 (图 2),基于芯片至壳逐层垂直传热的假设,计算得到各层材料的物理特性参数 (表 4),IGBT 结壳热阻为 17.3 °C /kW,FRD 结壳热

阻为 33.7 ℃ /kW。

表 4 实体模型材料参数

Tab. 4 Material properties of the practical IGBT module

名称	长 × 宽 / mm × mm	厚 /mm	热导率 / W·(m·℃) ⁻¹	热阻 / ℃·kW ⁻¹
芯片	13.5 × 13.5	0.2	157	7
焊层	13.5 × 13.5	0.17	33	28.3
金属化层	55 × 15	0.3	398	0.6
衬板	58.2 × 49.5	1	175	31.4

利用改变衬板底部热界面导热材料的方法对 IGBT 模块的热阻特性进行测试^[11]，结果如图 10 所示。图中，

每 2 条曲线的分离点代表对应芯片至该热界面分界层的热阻； R_{th} 代表热阻， C_{th} 为热容。

表 5 示出结壳热阻计算值和测试结果。可以看出，芯片至衬板的结壳热阻计算值与真实情况基本吻合，印证了热量垂直传递的假设。填充 0.12 mm 厚导热材料后，上管 IGBT 热阻为 40 K/kW，下管 IGBT 热阻为 41 K/kW，二者热阻差异为 2.5%；上管 FRD 热阻为 63 K/kW，下管 FRD 热阻为 62.5 K/kW，二者热阻差异为 0.8%。根据壳至散热器热阻测试结果可知，若排除导热材料涂覆不均等外在因素的影响，则在同等外在散热条件下，由主功率端子压力分布不均所导致的上下管热阻差异最大为 2.5%，对应 IGBT 模块在 1 kW 总功耗时出现的温升最大偏差在 0.5 ℃ 以内，满足实际使用需求。这表明主功率端子弹性压接技术能有效防止因压力不均引发的局部过温或温度失衡现象的发生。

表 5 结壳热阻计算值和测试结果

Tab. 5 Calculation results and test results of thermal resistance

位置	计算值 / (K·kW ⁻¹)	真实值 / (K·kW ⁻¹)	误差 / %
上管 IGBT	17.3	18.6	7.51
下管 IGBT	17.3	17.2	0.58
上管 FRD	33.7	31.6	6.23
下管 FRD	33.7	34.5	2.37

5 结语

压接式 IGBT 相对于焊接式 IGBT 的优势在于，主功率端子通过压接与衬板相连，从而规避了因焊接造成的热膨胀失配；同时，由于采用了免基板技术，IGBT 模块的热阻能够得到降低。本文对压接式 IGBT 模块封装主功率端子压接技术进行了研究，包括其对电气回路阻抗特性、对模块并联应用及对热性能的影响，验证了主功率端子压接技术在 IGBT 模块产品开发与应用中的有效性，同时也为 IGBT 模块的高集成设计提供了指导。后续将对最优压接力量化方案进行研究，并进行系统级试验。

参考文献：

[1] 蒋云富, 黄南, 袁勇, 等. 集成式 IGBT 功率组件的现状与发展趋势 [J]. 大功率变流技术, 2015(3): 1-6.
JIANG Y F, HUANG N, YUAN Y, et al. Status and Development Trends of Integrated IGBT Power Assembly [J]. High Power Converter Technology, 2015(3): 1-6.
[2] 张明. 现代电力电子集成技术综述 [J]. 大功率变流技术, 2016(1): 1-7.
ZHANG M. Overview of Modern Power Electronics Integration Technology [J]. High Power Converter Technology, 2016(1): 1-7.
[3] 吴义伯, 戴小平, 王彦刚, 等. IGBT 功率模块封装中先进互连技术研究进展 [J]. 大功率变流技术, 2015(2): 6-10.

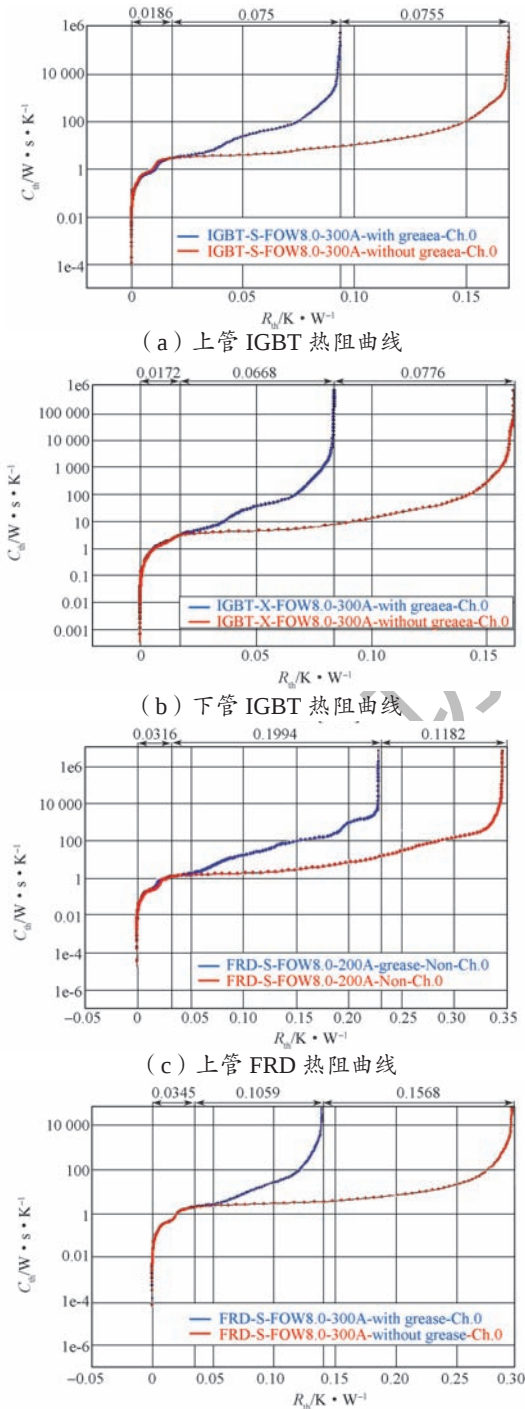


图 10 热阻测试结果

Fig. 10 Test results of thermal resistance

- WU Y B, DAI X P, WANG Y G, et al. State of the Progress of Advanced Interconnection Technology for IGBT Power Module Packaging [J]. High Power Converter Technology, 2015(2): 6-10.
- [4] 窦泽春, 刘国友, 陈俊, 等. 大功率压接式 IGBT 器件设计与关键技术 [J]. 大功率变流技术, 2016(2): 21-25.
- DOU Z C, LIU G Y, CHEN J, et al. Design and Key Technologies of High-power Press-pack IGBT Device [J]. High Power Converter Technology, 2016(2): 21-25.
- [5] POLLER T, BASLER T, HERNES M, et al. Mechanical analysis of press-pack IGBTs [J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(9): 2397-2402.
- [6] 王勇. 智能功率模块可靠性的有限元仿真研究 [D]. 上海交通大学, 2015.
- WANG Y. Research on Intelligent Power Module Reliability with Fea-Method [D]. Shanghai Jiaotong University, 2015.
- [7] 祁善军, 翁星方, 宋文娟, 等. 大功率 IGBT 模块并联均流特性研究 [J]. 大功率变流技术, 2011(6): 10-14.
- QI S J, WENG X F, SONG W J, et al. Research on Even Flow of High-power IGBT Module in Parallel [J]. High Power Converter Technology, 2011(6): 10-14.
- [8] 袁立强, 赵争鸣, 宋高升, 等. 电力半导体器件原理与应用 [M]. 机械工业出版社, 2011.
- [9] 丁杰, 唐玉兔, 忻力, 等. IGBT 模块封装的热性能分析 [J]. 机电传动, 2013(2): 9-12.
- DING J, TANG Y T, XIN L, et al. Thermal Performance Analysis of IGBT Module Packaging [J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(2): 9-12.
- [10] 吴煜东, 常桂钦, 彭勇殿, 等. 焊层空洞对 IGBT 模块热应力的影响 [J]. 大功率变流技术, 2014(1): 17-23.
- WU Y D, CHANG G Q, PENG Y D, et al. Effect of Solder Voids on IGBT Thermal and Stress Performance [J]. High Power Converter Technology, 2014(1): 17-23.
- [11] 奉琴, 李世平, 陈彦, 等. 基于结构函数的大功率 IGBT 热阻测量方法 [J]. 大功率变流技术, 2015(3): 39-41.
- FENG Q, LI S P, CHEN Y, et al. Measurement Method of IGBT Thermal Resistance Based on Structure Function [J]. High Power Converter Technology, 2015(3): 39-41.

(上接第 17 页)

能保证滤波器的性能。虽然所设计的无源滤波器谐波抑制和无功功率补偿能力好且成本低, 但当变频器处于低载工况时, 入网电流总谐波含量可能会大于 5%, 无法满足入网要求, 因此下一步我们将着重研究在低负载工况下的谐波抑制问题。

参考文献:

- [1] 崔怀宇, 贾晓辉, 尚尔发. 变频器常用 3 种经济型滤波方法对比 [J]. 陕西电力, 2010, 38(9): 59-62.
- CUI H Y, JIA X H, SHANG E F. Comparison on 3 Practical Economy Filtering Methods for Converter [J]. SHAANXI ELECTRIC POWER, 2010, 38(9): 59-62.
- [2] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] 王晓远, 吕海英, 祝黎辉. PWM 逆变器中新型共磁芯滤波器的设计与应用 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 65-70.
- WANG X Y, LV H Y, ZHU L H. Design and application of inductors with shared magnetic core for PWM inverter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 65-70.
- [4] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] 孙锦, 方超, 曹亮. 变频器输入电抗器及直流滤波电容器的设计 [J]. 应用科技, 2014(2): 16-20.
- SUN J, FANG C, CAO L. Research on the design of input reactor and DC filter capacitor for frequency converter [J]. Applied Science and Technology, 2014(2): 16-20.
- [6] 贺建闽, 黄治清, 李群湛. 电网背景谐波电压测量与研究 [J]. 铁道学报, 2005, 27(6): 28-33.
- HE J M, HUANG Z Q, LI Q Z. Measurement and Study of Background Harmonic Voltages in Power Systems [J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(6): 28-33.
- [7] 林飞, 杜欣. 电力电子应用技术的 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

第五届全国电能质量学术会议征文通知

全国电能质量学术会议是电能质量领域重要的学术交流和行业交流的高水准平台, 由中国电源学会电能质量专业委员会和亚洲电能质量产业联盟联合主办。第五届全国电能质量学术会议将于 2017 年 8 月 17-19 日在苏州举行, 现正式启动征文工作。

会议主题: 能源互联网时代电能质量机遇与挑战

征文范围: 配电网和用电侧电能质量的规划、动态、标准与趋势; 配电网和用电侧电能质量问题及解决方案; 主动配电网与电能质量; 电能质量与大数据; 分布式发电和智能微电网领域中的电能质量问题及解决方案; 电动汽车领域中的电能质量问题及解决方案; 轮船、飞机等独立电网中的电能质量问题及解决方案; 电能质量经济分析、节能减排作用分析、应用情况及工程案例; 电能质量的典型问题(谐波、无功、不平衡、暂降等)分析及控制、综合治理技术与方法; 电能质量的监测、分析、综合评估技术与方法; 新型电能质量控制装置的原理、控制方法、设计与制造技术以及应用方法; 电能质量新需求与对策; 电能质量新技术与标准; 电能质量标准、电能质量管理等进展、方法、应用。

征文邮箱: zhuanweihui@cnaction.com

联系人: 中国电源学会电能质量专业委员会 薛艳梅

联系电话: 029-85691735 转 8609、8106

投稿截止日期: 2017 年 5 月 31 日

欢迎踊跃投稿!