

并联功率端口不均流对IGBT模块热特性的影响

张兰涛,熊俊,牛小南,黄小羽

(国网北京电力公司电缆分公司,北京 100020)

摘要:针对大功率IGBT模块在短路极端运行条件下的可靠性问题,将器件的功率端口不均流现象和由此产生的动态结温变化进行综合分析。首先,通过实验对英飞凌某型3 300 V/1 500 V IGBT模块在短路条件下的并联端口均流特性进行测试,进而得到不同功率端口的功率损耗。其次,采用有限元法构建IGBT模块的热模型,进一步研究功率端口不均流对IGBT芯片瞬态热特性的影响。研究表明,短路条件下的端口电流差异可达1 500 A,其导致IGBT结温相差11 °C左右,进而增加器件发生瞬时热失效的风险。研究结论可为功率半导体器件的优化设计提供指导。

关键词:IGBT模块;短路;并联均流;结温

中图分类号:TN322 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22609

Impact of Non-uniform Current in Parallel Power Terminals on IGBT Temperature Characteristics

ZHANG Lantao, XIONG Jun, NIU Xiaonan, HUANG Xiaoyu

(State Grid Beijing Electric Power Cable Branch Co., Ltd., Beijing 100020, China)

Abstract: Aiming at the reliability problem of high-power IGBT modules under short circuit extreme operating conditions, the power terminals imbalanced current of IGBT modules and the resulting dynamic junction temperature change were comprehensively analyzed. Firstly, the current sharing characteristics of parallel terminals of an Infineon 3 300 V/1 500 V IGBT module under short circuit was tested by experiments, and the power loss of each terminal was obtained. Secondly, the thermal model of the IGBT module was built by finite element method, and the effect of imbalanced current on the transient thermal characteristics of IGBT chips was further studied. The results show that the difference of terminals current under short circuit can reach 1 500 A, thus causes the junction temperature of IGBT to differ by about 11 °C, which increases the risk of transient thermal breakdown of IGBT. The conclusions could provide guidance for optimal design of IGBT modules.

Key words: IGBT module; short circuit; parallel current sharing; junction temperature

绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)是一种全控型开关器件,具有耐压性能好、开关频率高、易于驱动控制等诸多优点,目前已成为各类电力电子装置中的核心部件^[1]。为提高电力电子装置的功率密度,现代生产的大功率IGBT模块大多采用多芯片、多子模块并联的封装工艺。由于芯片或模块内部寄生参数的分散性等原因,导致模块不同功率端口的输出电流存在不一致性。电流分配不均会导致IGBT模块并联芯片功率损耗的不一致,尤其在短路等极端运行条件下,芯片之间的结温差异也更加明显。不均流问题严重时会使电流过大的IGBT

温度超标,进而对整个系统的可靠性产生灾难性危害^[2]。因此,将器件的功率端口不均流现象和由此产生的动态结温变化进行综合分析,对器件和电力电子装置的运行可靠性都具有重要意义。

短路是IGBT器件的一种典型工况,短路发生时IGBT将同时承受高压和大电流,瞬时的高功率损耗将导致结温迅速升高。当进一步考虑并联端口不均流问题时,部分芯片发生瞬时热失效的“短板效应”也将被进一步放大。由于短路持续时间为 μs 级,针对此条件下的结温测量依旧是行业内尚未完全解决的一个难点,目前普遍采用仿真模拟的方法^[3]。同时,现有研究鲜有将芯

片不均流和短路极端工况下的结温问题相结合。文献[4]通过实验得到了IGBT模块的功率损耗,并采用内热源平均化的方式得到了单一芯片的损耗,进而通过有限元法(finite element method, FEM)模拟了IGBT在短路下的温度特性;文献[5]同样采用了将内热源平均化的处理方法,并将研究对象进一步扩展到了全部的并联IGBT芯片上,但这些处理方法忽略了模块内部客观存在的不均流现象;文献[6-7]基于Icepak和PSpice构建了IGBT的电热模型,能够对考虑温度反馈下的芯片短路电热特性进行更为精确的模拟,但其研究对象为单个IGBT芯片,因此也未能综合考虑模块内部的不均流问题。

基于现有研究存在的不足,本文以大功率IGBT模块并联功率端口的均流特性为切入点,采用实验测量与仿真模拟相结合的方法,首先通过实验对英飞凌3 300 V/1 500 A模块的并联端口电气特性进行研究,然后根据模块的实际结构,构建全尺寸下的有限元热仿真模型,最后分析短路条件下并联端口不均流对IGBT瞬态温度特性的影响。

1 IGBT 模块均流特性概述

本文以英飞凌生产的某型3 300 V/1 500 A大功率IGBT模块为研究对象,其实物图与内部电路如图1所示。

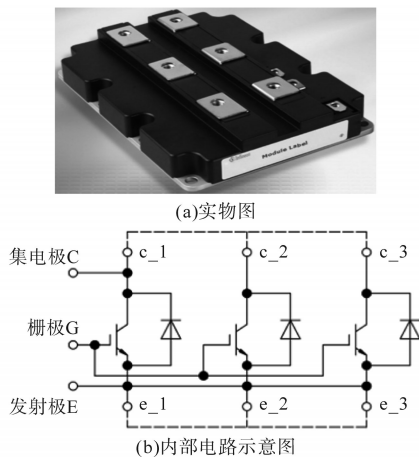


图1 英飞凌3 300 V/1 500 A IGBT模块及其内部电路

Fig. 1 Infineon 3 300 V/1 500 A IGBT module and the internal circuit

为提高器件的通流能力,该型模块内部总共集成了24只并联的IGBT芯片。如图2所示,每4只IGBT芯片及其反并联二极管(Diode)芯片被集成在一个陶瓷衬底上,构成了并联子模块。每两

个子模块进一步并联组成为IGBT模块的功率变换单元,在模块外部即表现为图1a所示的3个功率端口的并联。

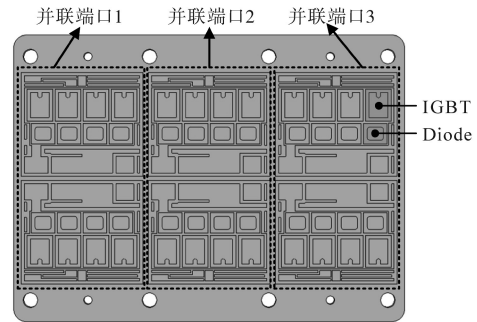


图2 待测IGBT模块内部的芯片布局

Fig. 2 Internal structure of IGBT module under tested

根据图1a可知,该型3 300 V/1 500 A模块可以看作是由一个驱动单元控制的三个并联的IGBT,在忽略内部不均流问题的理想条件下,每组功率端口将承担500 A的额定电流。然而,由于芯片数量较多,子模块功率回路中杂散参数的差异也不可避免,这是导致IGBT模块并联端口之间出现不均流现象的主要原因之一^[8]。此外,在实际应用中,IGBT模块与层叠母排共同构成换流回路,母排的结构往往难以保证绝对的对称,这也将进一步影响不同IGBT模块之间的均流特性^[9]。

2 IGBT 并联端口短路均流测试

IGBT的短路工况可分为I类短路和II类短路。前者为IGBT导通时便直接进入短路状态;后者为IGBT首先从阻断状态进入导通状态,然后进入短路状态。两种短路的共同点是IGBT会出现退饱和现象,其标志是模块的集-射极压降迅速上升至直流母线电压^[10]。其中,I类短路特性与IGBT器件自身的性能紧密相关,本文的测试也是在典型I类短路工况下进行的,测试的原理如图3所示。

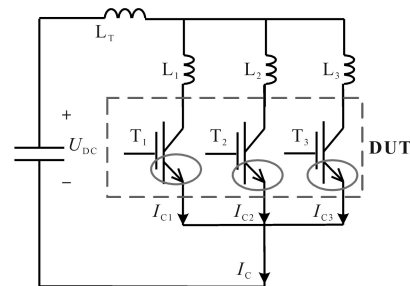


图3 实验测试原理

Fig. 3 Principle of experimental test

图3中, L_T 表示测试电路的杂散电感; T_1, T_2, T_3 分别代表被测器件(device under test, DUT)三个并联端口的功率变换子单元; L_1, L_2, L_3 分别代表并联端口内部的集总寄生电感。设置直流母线电压 U_{DC} 为 1 800 V, 短路时间为 10 μ s, 采用三组罗氏线圈对 DUT 并联功率端口的短路电流 I_{C1}, I_{C2}, I_{C3} 进行同时采集, 测试结果如图4所示。

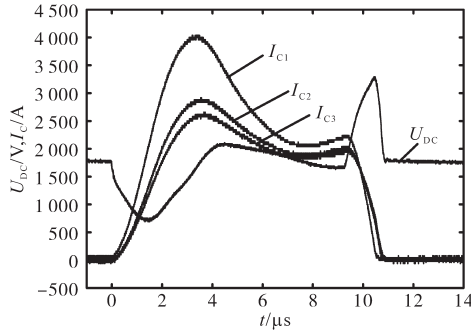


图4 短路条件下并联端口均流特性实验测试结果

Fig.4 Experimental results of current sharing characteristics of parallel ports under short circuit condition

由测试结果可知, 由于端口支路间的寄生电感不一致, 三个功率端口的短路电流也存在明显差异, 其中端口 T_1 和 T_3 的短路电流峰值相差可达 1 500 A。在短路条件下, 由于 IGBT 模块承担全部直流母线电压, 此时不同端口内部 IGBT 芯片的功率损耗也将产生明显区别, 从而进一步加剧高损耗芯片的结温。

传统的短路研究普遍忽略了模块内部的不均流问题, 在进行装置设计时也较多粗略地认为每个功率端口的导通电流为集电极总电流的三分之一。如果继续按照这种思路进行装置设计与驱动保护, 当器件遭遇短路这类极端运行条件时, 由于电流分布不均, 模块内部的高损耗芯片可能会由于瞬时电流过大而发生瞬时热失效, 进而导致模块热失效的连锁效应。

受测量手段的限制, 目前尚无法直接对 μ s 级短路条件下的结温进行有效监测。下面通过 FEM 仿真的方法对 IGBT 模块功率端口不均流下的动态温度分布问题进行分析。

3 短路下的瞬态热仿真分析

IGBT 的温度特性存在明显的时空分布特性, 其温度分布也是自热效应和热传导共同作用的结果, 因此对 IGBT 瞬态热问题的分析应同时从时间和空间两方面进行考虑。对上述研究的短路工况而言, 由于电流持续时间为 10 μ s, 该时间

尺度尚未超过芯片层的热时间常数^[11], 此时芯片温升由芯片自热效应引起, 导致并联端口内部芯片结温升高的能量 E_{SC} 如下式所示:

$$E_{SC,i} = \int_0^{t_w} I_{C,i} \cdot U_{CE} dt \quad (1)$$

式中: i 为三个并联端口, 分别为 1, 2, 3; t_w 为短路持续时间; $I_{C,i}$ 为并联端口的短路电流; U_{CE} 为各并联端口的集-射极压降。

随着时间尺度的增大, 需要进一步考虑热传导的作用。对 IGBT 模块而言, 其动态传热特性可用三维非稳态传热偏微分方程进行描述:

$$\nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: ρ 为材料密度; c_p 为比热容; T 为温度; λ 为材料热导率; q 为单位时间内单位体积中内热源的生成热, 该参数由图4的实验数据得到。

为了精确求解各端口内部 IGBT 芯片在短路条件下的动态传热问题, 首先根据待测模块的实际结构, 在三维建模软件中构建了精准的三维几何模型, 并进一步在 FEM 仿真平台下构建了热仿真模型。为提高模型精度, 在材料属性定义时考虑了硅芯片的温度敏感性^[12], 同时对芯片的有源区进行了细分。

瞬态热仿真采用的基本设置为: 1) 模块基板底面设置为恒温(室温 22.5 $^{\circ}$ C), 其他表面设置为绝热; 2) 设置芯片有源区为热源, 根据图4的实验测试结果可得到三个并联端口在短路下的功率损耗, 如图5所示。3) 仿真总时间设置为 1 ms。

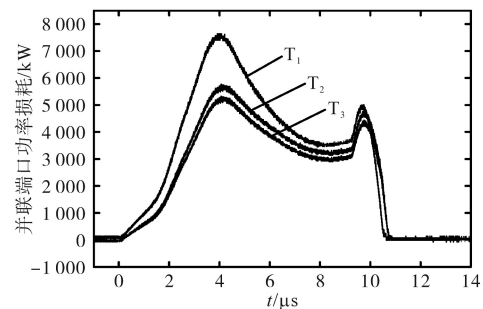


图5 短路条件下的并联端口功率损耗

Fig.5 Power loss of parallel ports under short circuit

在仿真时将得到的损耗参数平均加载到各端口对应的 IGBT 芯片有源区上。此处需要说明的是, 由于本文的研究重点为 IGBT 模块并联端口之间的不均流, 因此, 并未进一步考虑单个并联子单元内部的芯片均流问题。为提高仿真效率, 采用了变步长的仿真计算策略, 其中前 10 μ s 的短路持续时间采用 0.2 μ s 的小步长计算, 后续

的时间则采用自由变步长计算。图6给出了短路结束时刻IGBT模块的温度分布云图。

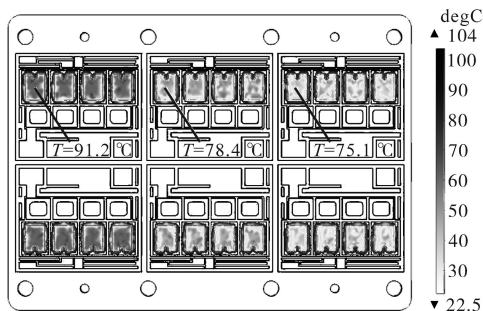


图6 短路结束时刻IGBT模块的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of IGBT module at the end of short circuit

由仿真结果可知,短路结束时刻三个并联端口内部的芯片温度已经产生了明显差异,同时单只芯片自身也存在温度分布不均衡的特点。图中标注的是三组芯片表面某点的温度,分别为 $91.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $78.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $75.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。整体来看,端口 T_1 内的芯片结温最高, T_2 次之, T_3 内的芯片结温则最低。由前述的分析可知,短路时间内的温升主要由功率损耗下的芯片自热决定,仿真中所示的趋势与图4、图5的实验测试结果一致。

为进一步分析更长时间尺度下的动态传热特性,分别提取了每个并联端口内部所有芯片的平均温度,绘制的温升曲线如图7所示。可见,三个并联端口内部芯片的结温变化规律是类似的。在 $10\text{ }\mu\text{s}$ 的短路时间内,芯片温度在功率损耗作用下迅速升高。由于端口不均流的影响,端口 T_1 和 T_3 内部芯片的平均结温差可达 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

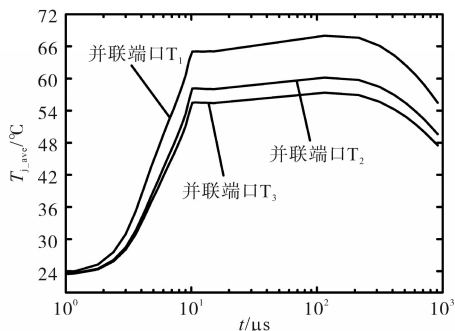


图7 并联端口内部芯片的平均结温变化曲线

Fig.7 Average junction temperature of chips in parallel ports

需要注意的是,由于采样位置为芯片表面,随着时间常数的增大,热传导逐渐开始作用,因此在短路结束后($10\sim 100\text{ }\mu\text{s}$)各组芯片的温度仍然出现了些许升高。而当时间常数增大到毫秒级时,热传导的作用逐渐明显,此时芯片温度均表现为下降。可见仿真结果能够对短路条件下

IGBT模块端口不均流引起的结温动态时空变化特性进行有效地定量表征。

4 结论

针对英飞凌3 300 V/1 500 A大功率IGBT模块,本文对并联功率端口在短路条件下的电气特性和温度特性进行了实验和仿真研究。结果显示,短路条件下并联功率端口的电流差异可达1 500 A,其导致IGBT平均结温相差 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,这在一定程度上可以对IGBT模块经常由于单只芯片发生热击穿而失效的原因进行解释。本文采用的研究方法具有通用性,同样适用于其他电力电子器件。在将来的研究工作中,可以进一步开展针对器件内部寄生参数的精细化测量,并构建寄生参数与芯片电气特性、温度特性的定量关系,从而为大功率IGBT器件的结构优化设计及其在极端运行条件下的可靠性分析提供指导。

参考文献

- [1] 王倩,施荣,刘丽,等.适用于大功率绝缘栅双极型晶体管的两段式有源门极关断技术的研究[J].电气传动,2018,48(10):75-78.
Wang Qian, Shi Rong, Liu Li, *et al.* Research on two-stage active gate turn-off technique for high power IGBTs[J]. Electric Drive, 2018, 48(10): 75-78.
- [2] 唐新灵,张朋,陈中圆,等.高压大功率压接型IGBT器件封装技术研究综述[J].中国电机工程学报,2019,39(12):3622-3638.
Tang Xinling, Zhang Peng, Chen Zhongyuan, *et al.* Review of high voltage high power press pack IGBT package technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3622-3638.
- [3] 段耀强,罗毅飞,肖飞,等.大功率IGBT基区物理模型的非准静态建模方法综述[J].高电压技术,2019,45(7):2062-2073.
Duan Yaoqiang, Luo Yifei, Xiao Fei, *et al.* Review of non-quasi static modeling method in the base region of high power IGBT[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2062-2073.
- [4] Bahman A S, Iannuzzo F, Uhrenfeldt C, *et al.* Modeling of short-circuit-related thermal stress in aged IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 4788-4795.
- [5] Castellazzi A, Johnson M, Piton M, *et al.* Experimental analysis and modeling of multi-chip IGBT modules short-circuit behavior[C]// IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2009: 1-7.
- [6] Wu R, Iannuzzo F, Wang H, *et al.* An Icepak-PSpice co-simu-

(下转第80页)

identification system[C]//IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia, IEEE, 2012.

[13] Geev M, Pierluigi S, Antonio P. Identification of ferro resonance based on S-transform and support vector machine[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18 (9) : 1412-1424.

[14] Wang M J, Gao H L, Zou G B, *et al.* Disturbance identification method for lightning wave invading grid[C]//4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Weihai, China, IEEE, 2011.

[15] Liao Y F, Yang G J, Gao W. Internal over-voltage identification method of distribution network based on AD-SVM algorithm[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019.

[16] Gao W, Wai Y J, Liao Y F, *et al.* Internal overvoltage identification of distribution network via time-frequency atomic decomposition[J]. IEEE Access, 2019, 7: 85111-85122.

[17] 廖宇飞, 杨耿杰, 高伟, 等. 基于 AD-CNN 算法的配电网内部过电压识别技术[J]. 高电压技术, 2019, 45 (10) : 3182-3191.

Liao Yufei, Yang Gengjie, Gao Wei, *et al.* Recognition technology of internal overvoltage in distribution network based on AD-CNN algorithm [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45 (10):3182-3191.

[18] 高伟, 郭谋发, 许立彬. 基于改进 CWD-CNN 的配电网内部过电压类型识别方法[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(8) : 131-140.

Gao Wei, Guo Moufa, Xu Libin, *et al.* Recognition method of internal overvoltage type for distribution network via improved CWD-CNN[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24 (8) : 131-140.

[19] ECC-ALL. Edge computing reference architectures 2.0[R]. Beijing: Edge Computing Consortium (ECC) and Alliance of Industrial Internet(AII), 2017: 50.

[20] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[C]//international conference on learning representations, 2015.

收稿日期:2020-10-14
修改稿日期:2020-12-03

(上接第49页)

lation method to study the impact of bond wires fatigue on the current and temperature distribution of IGBT modules under short-circuit[C]// 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014: 5502-5509.

[7] Wu R, Iannuzzo F, Wang H, *et al.* Electro-thermal modeling of high power IGBT module short-circuits with experimental validation[C]// 2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2015: 1-7.

[8] Li Helong, Zhou Wei, Wang Xiongfei, *et al.* Influence of paralleling dies and paralleling half-bridges on transient current distribution in multichip power modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8) : 6483-6487.

[9] 张经纬, 程植, 谭国俊. 母排杂散电感对 IGBT 模块功率端子不均流影响[J]. 电力电子技术, 2017, 51(7) : 77-79.

Zhang Jingwei, Cheng Zhi, Tan Guojun. Research on uneven current of IGBT module power terminals by busbar stray inductance[J]. Power Electronics, 2017, 51(7) : 77-79.

[10] Chen Yuxiang, Li Wuhua, Iannuzzo Francesco, *et al.* Investigation and classification of short-circuit failure modes based on three-dimensional safe operating area for high-power IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (2) : 1075-1086.

[11] Hartmann S, Bayer M, Schneider D, *et al.* Observation of chip solder degradation by electrical measurements during power cycling[C]// 2010 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, 2010: 1-6.

[12] Lutz J, Schlangenotto H, Scheuermann U, 等. 功率半导体器件: 原理、特性和可靠性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

Lutz J, Schlangenotto H, Scheuermann U, *et al.* Semiconductor power devices: physics, characteristics, reliability[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.

收稿日期:2020-10-30
修改稿日期:2020-11-24