

高压 IGBT 劣化机理分析及状态监测技术研究综述

祝令瑜, 占 草, 刘琛硕, 代建港, 汲胜昌
(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 基于模块化多电平换流器(MMC)的柔性直流输电(VSC-HVDC)技术在电力传输等领域得到广泛应用。高压 IGBT 的劣化机理分析及状态监测技术对于保证 MMC 的可靠性具有重要意义。高压 IGBT 有焊接型和压接型两种不同的封装形式。目前焊接型 IGBT 的劣化机理研究综述较多, 但是缺乏压接型 IGBT 的相关总结。因此, 首先总结了压接型 IGBT 的状态劣化形式和机理。然后从电学、热学和绝缘参量的角度分析了近年来国内外高压 IGBT 状态监测领域的研究现状, 特别补充了关于压接型 IGBT 的有关内容。最后, 基于对国内外研究中存在问题的分析, 展望了 MMC 用高压 IGBT 状态监测技术的发展趋势和值得深入研究的方向。对于 MMC 用高压 IGBT 状态监测技术研究具有一定意义。

关键词: 高压 IGBT; MMC; VSC-HVDC; 劣化机理; 状态监测; 压接型 IGBT

Review of Deterioration Mechanism Analysis and Condition Monitoring Technology for High Voltage IGBT

ZHU Lingyu, ZHAN Cao, LIU Chenshuo, DAI Jianguang, JI Shengchang

(State Key Lab of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Modular multilevel converter (MMC) based voltage-sourced-converter high-voltage-direct-current (VSC-HVDC) technology has been widely utilized in power transmission field. Deterioration mechanism analysis and condition monitoring technology of high voltage IGBT is of significance to maintain the reliability of MMC. The current packaging technologies of high voltage IGBT contain bond-wire and press-pack. The review on the failure mechanism of bond-wire IGBT is sufficient compared to press-pack IGBT (PPI). Therefore, in this paper, the condition deterioration modes and mechanism of PPI are summarized firstly. Secondly, the domestic and foreign research status of condition monitoring methods of high voltage IGBT is summarized based on electrical, thermal and insulation parameters in recent years, especially for high voltage PPI. Finally, according to the problem of state-of-the-art, the development trend and prospective research interests in the area of condition monitoring method of high voltage IGBT used in MMC are proposed. This paper is meaningful for the condition monitoring of high voltage IGBT used in MMC.

Key words: high voltage IGBT; MMC; VSC-HVDC; deterioration mechanism; condition monitoring; press-pack IGBT(PPI)

0 引言

基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电(voltage sourced converter-high voltage direct current, VSC-HVDC)技术没有无功补偿问题, 没有换相失败问题和适合构成多端直流输电系统, 广泛应用于海上风电场接入电网, 多端直流输电和构筑城市直流配电网等领域^[1-5]。MMC 是柔性直流输电系统中的核心设备,

其上下桥臂包含多个子模块, 子模块中绝缘栅双极晶体管(insulatedgate bipolar transistor, IGBT)实现投切功能^[6]。随着运行年限的增加, 数量众多的高压 IGBT 遭受热机疲劳应力逐渐发生状态劣化, 影响了 MMC 的运行性能, 需要研究子模块高压 IGBT 劣化机理与状态监测技术以保障系统可靠运行。

文献[7-9]对 IGBT 器件的老化失效机理、可靠性评估方法、状态监测方法以及寿命预测研究进行了系统性的总结和介绍。2010 年, 文献[7]介绍了 IGBT 器件物理失效机制, 可靠性分析模型以及在线监测参数指标, 指明热机疲劳是导致 IGBT 器件损耗失效的主要原因, 在线监测技术的发展需要进

一步研究 IGBT 失效机理。该文献还提出不附加传感器的在线监测 IGBT 状态需要结合装置的运行特性以及器件老化特性。2015 年,文献[8]进一步总结了 IGBT 器件的物理失效机制与在线监测参数指标和类型,并综述了 IGBT 剩余寿命模型与寿命预测的相关研究内容。该综述指出 IGBT 损耗失效机理是多重因素共同决定的,表征 IGBT 状态劣化程度的参数演化规律需要根据多重老化机理进行解释。该文献特别指出 IGBT 运行状态信息以及 IGBT 的热学模型参数可以用于器件在线监测和寿命预测。2017 年,文献[9]在此基础上,对 IGBT 主动热管理技术进行了综述,涉及到 IGBT 热路模型的研究。这些文献对于高压 IGBT 在线监测技术的进展与不足进行了深入总结分析,清晰地综述了在这一领域目前已经取得的研究成果以及未来的发展方向,但是缺少基于绝缘参数的状态监测以及近几年出现的压接型 IGBT 状态劣化机理和功率器件在线监测研究的最新进展等内容。

本文根据目前的研究现状以及存在的问题,特别针对压接型 IGBT(press-pack IGBT, PPI),介绍了 PPI 状态劣化机理的研究现状。在此基础上,基于电学、热学以及绝缘参数综述了目前国内外关于高压 IGBT 状态监测技术的研究现状。最后从目前研究存在的问题入手讨论了柔性直流输电用高压 IGBT 状态监测技术在未来值得深入研究的方向。

1 IGBT 状态劣化机理

焊接型 IGBT(power module IGBT, PMI)的状态劣化研究较为充分,键合线脱离和焊料层失效是影响 PMI 可靠性的主要因素。已有的综述已经对 PMI 劣化机理进行了充分的总结,本文主要针对高压 PPI 的劣化机理进行综述。

1.1 PPI 封装结构

WESTCODE 公司生产的 PPI 器件采用硬压的封装结构。器件内部具有若干相互并联的层式结构单芯片子单元,芯片位于子单元上下钼层之间,通过夹紧力连接,保证均匀的电热接触。银层位于铜电极与下钼层之间,起缓冲和平衡压力的作用。聚醚醚酮(poly-ether-ether-ketone, PEEK)材料框架结构起固定作用。门极弹簧连接门极触发引线和芯片门极区域,器件结构如图 1 所示^[10]。PPI 的封装结构特点使功率器件具有耐受电压高,流通电流大,双面散热以及短路失效的优点^[11],逐渐成为柔性直

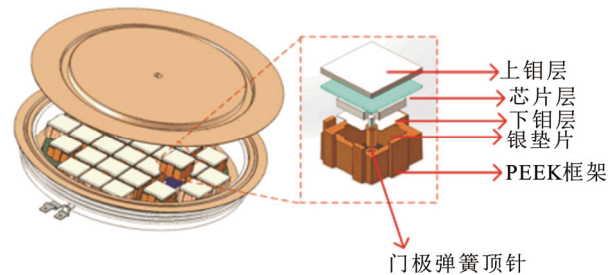


图 1 PPI 封装结构

Fig.1 PPI packing structure

流输电 MMC 用 IGBT 的主要封装形式。

1.2 PPI 状态劣化机理

PPI 状态劣化机理的研究目前主要从试验和仿真两个方面展开。工程中 IGBT 的使用寿命一般要求在十年以上,在实际工况下进行 IGBT 热老化试验需要相当长的时间,这对于学术研究显然是不现实的。功率循环试验是评估电力电子器件可靠性的一种重要试验方法^[12],通过功率循环平台开展加速老化试验,模拟高压功率器件在实际运行状态下的热机疲劳失效过程,是研究功率器件状态劣化机理与特性的可行方法。

通过对高压 PPI 开展功率循环试验,已经得到了 PPI 在长期热机应力作用下的几种状态劣化形式。根据失效机理,可将 IGBT 器件的失效分为过应力失效和损耗失效。过应力失效一般为电应力失效,表现形式为电流电压冲击,静电放电以及门锁效应等,多发生在芯片层,且时间尺度较短。损耗失效为热老化失效,热老化发生的时间尺度较长,经常伴随着器件整个寿命周期^[13]。本文将器件的损耗失效机理称为状态劣化机理。PPI 在开通关断过程中由损耗产热,在水冷过程散热,从而形成结温摆幅。由于 PPI 封装材料热膨胀系数(coefficient of thermal expansion, CTE)的不匹配,结温摆幅会引起器件内部热胀冷缩,导致层式结构之间的微动磨损使器件发生劣化^[14]。PPI 器件内部各层材料经历膨胀和收缩,使得门极弹簧经受大小波动的热应力,逐渐老化而松弛。这种松弛导致门极弹簧针与芯片的栅极焊盘之间接触电阻的增加,从而提高了门极的局部温度导致器件失效^[15]。PPI 内部子单元结温分布不均和热应力分布不均匀之间的相互耦合作用会引起层式结构发生局部翘曲^[16]。这种局部翘曲进一步发展会导致层间失去接触,在器件承受电压时形成微弧放电,引起器件局部电弧烧蚀^[14]。另外,

由于芯片发射极与下钼层接触部分的机械应力较为集中, 在长时间的热机疲劳作用下, 门极氧化层损坏导致器件门极状态发生劣化^[15]。目前的研究只是对器件劣化的形式进行分析, 没有建立 PPI 在全寿命周期过程中的多重劣化机理体系, 也没有明确指出器件发生劣化的主要形式与原始动力。

利用有限元仿真技术可以获得器件在不同劣化形式下的热机应力分布, 研究器件在全寿命周期过程中的多重劣化机制, 分析器件劣化的原始动力。在功率循环过程中, PPI 内部存在“电-热-机”多物理场耦合作用。器件功率损耗由器件导通电流和电压决定, 而电压与温度呈线性关系, 也就是说温度的升高导致了功率损耗的升高, 功率损耗的升高又进一步引起温度的升高。显然, 器件内部热模型和损耗模型之间存在双向耦合的关系。接触电阻和接触热阻的大小与器件材料在热胀冷缩过程中产生的压力有关。接触电阻的增大引起导通压降的升高从而增加了热量的产生, 接触热阻的增大影响了热量的扩散, 因此接触热阻和电阻是器件“电-热-机”多物理场耦合的关键参数。PPI 器件内部损耗模型、热模型和固体力学模型之间存在双向耦合关系, 如图 2 所示^[17]。

华北电力大学邓二平等通过建立 PPI 的多物理场有限元仿真模型研究了温度对 PPI 压力分布的影响。通过实验和仿真结合的方法拟合得到集电极与发射极两侧总的接触热阻与压力之间的关系以及内部子单元总的接触电阻与压力的关系, 建立了包含温变的导通压降参数的电热耦合模型。计算得到的内部热场分布以及器件整体变形分别如图 3 和 4 所示, 可以发现功率循环过程中芯片温度明显分布不均, 且边缘温度较高导致器件发生翘曲^[17]。该耦合模型准确计算得到了器件内部热机应力与位移分布, 说明了器件在功率循环过程中存在翘曲现象。但是由于该模型的接触电阻与热阻参数的获取依赖试验, 所以并不能用于不同表面粗糙度下微动磨损引起的器件状态劣化机理研究。

重庆大学赖伟等人仿真研究了芯片表面粗糙度增加对器件芯片温度分布的影响^[18]。经历功率循环以后芯片表面因为微动磨损导致表面粗糙度增加, 仿真结果显示当表面粗糙度达到 1.27 μm 时, 最大结温达到 158 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 远远高于器件的允许最大结温值。状态劣化前后器件芯片温度分布分别如图 5 和图 6 所示。该仿真模型没有利用器件内部的

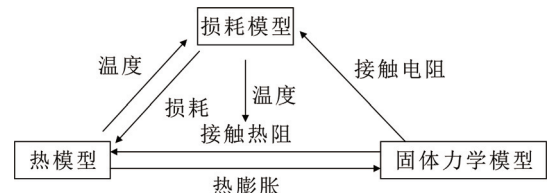


图 2 PPI 多物理场耦合关系

Fig.2 PPI multi-physical fields coupling relationship

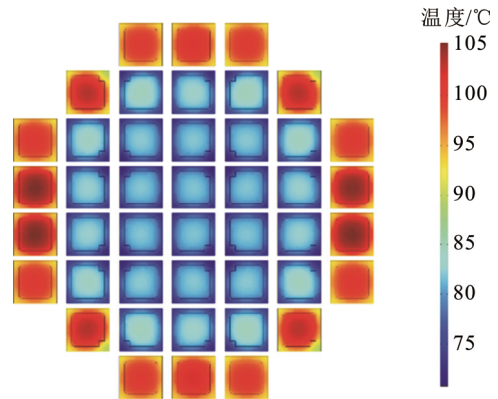


图 3 芯片温度分布

Fig.3 Temperature distribution of chip

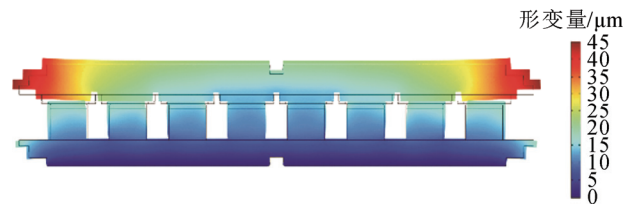


图 4 PPI 整体变形

Fig.4 Deformation of PPI

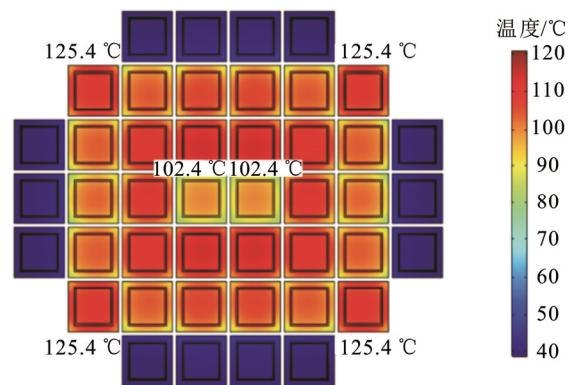


图 5 状态劣化前芯片温度分布

Fig.5 Temperature distribution of chip before deterioration

多物理场双向耦合关系, 导致得到的器件表面粗糙度与结温的关系并不准确。

高压 PPI 的状态劣化机理研究需要提出考虑器件微动磨损作用的多物理场耦合仿真模型, 准确计

算不同表面粗糙度下器件内部热机应力分布。根据热机应力的分析结果以及器件参数演化特性建立劣化模型, 提出全寿命周期过程中的高压 PPI 多重状态劣化机理体系, 明确器件状态劣化的主要形式和原始动力。

目前文献中提出了大量针对 PMI 的状态监测方法, 对于多芯片并联的 PPI 整体器件状态监测技术研究较少。文献[13]将功率器件状态劣化程度的监测方法分为基于器件参数的老化特征量表征方法, 内置传感器的监测方法和基于模型的器件状态监测方法。本文主要综述基于电学参数、热学参数以及绝缘参数的器件状态监测技术研究现状。首先对目前已有的单芯片 PPI 的导通电阻演化规律进行介绍, 进一步综述了 IGBT 导通压降结温修正以及参数获取方法研究现状。基于热路模型的结温预估技术对不同封装结构的 IGBT 同样适用, 因此在基于热学参数的状态表征量部分重点介绍了热路模型预估结温方法的研究现状, 并对 PMI 热敏电参数法的研究进展进行总结。在基于绝缘参数的状态监测研究部分, 以 PMI 局部放电测试加压方式以及局部放电特性研究为前提, 介绍了 PPI 子单元局部放电特性研究进展, 并指出了目前研究存在的问题。

2 基于电学参量的状态特征量

IGBT 的电学参量分为静态参量和动态参量, 本文将分两个部分进行综述。

2.1 静态参量

IGBT 流过电流产生一定的导通压降 U_{CE} , 导通压降或者导通电阻不仅与器件在运行过程中发生的状态劣化有关, 也与器件的结温相关。利用导通压降 U_{CE} 随器件状态劣化程度的演化规律监测 IGBT 器件的状态是一个可行的方案, 但是需要修正结温对导通压降 U_{CE} 的影响。导通压降的数值和变化量相比直流母线电压很小, 需要提出高精度、高灵敏度、非侵入的获取方法^[19]。该部分将从到导通压降或者导通电阻的演化规律, 结温的修正方法以及导通压降在线获取方法 3 个方面进行总结。

1) 导通压降的演化规律

2018 年, 重庆大学江泽申等人测试了单芯片 PPI 导通电阻在功率循环过程中的演化规律, 得出了单芯片 PPI 的导通电阻随功率循环呈现增长趋势的结论, 导通电阻演化规律如图 7 所示^[20]。该测试结果波动较大且测试样本较少, 缺乏统计意义。另

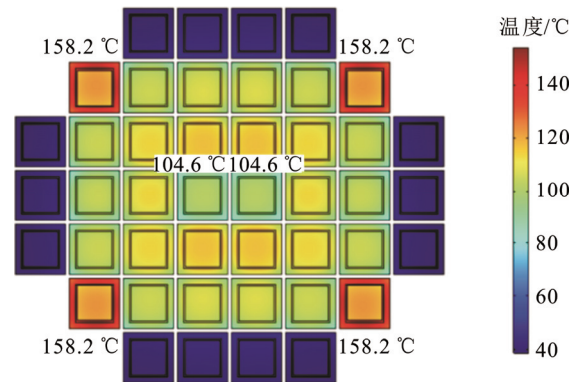


图 6 状态劣化后芯片温度分布

Fig.6 Temperature distribution of chip after deterioration

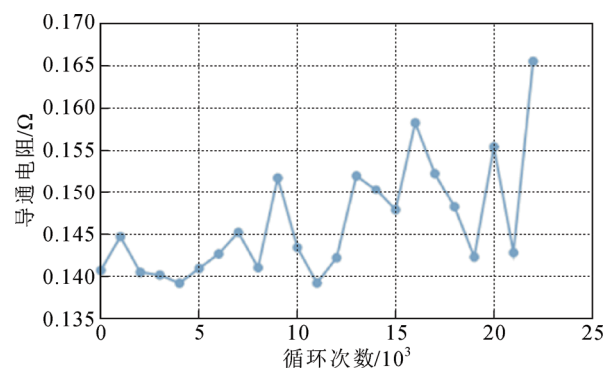


图 7 导通电阻演化规律

Fig.7 Evaluation law of on-state resistance

外, 由于单芯片 PPI 没有压力不均匀分布导致的温度不均匀分布等问题, 需要对实际工程中使用的多芯片并联 PPI 整体模块开展进一步研究。

相比 PPI 的导通压降演化规律研究, PMI 的研究已经十分充分。2013 年, Bing Ji 等人测试得到了 PMI 在功率循环过程中导通压降在不同温度下的数值和相对误差^[21]。实验结果表明, PMI 在有一半数量的键合线失效时, 导通压降会增加 7%。2014 年, 海军工程大学唐勇等人监测到 PMI 的导通压降等参数变化, 发现了在高温条件下 PMI 可靠性降低表现为压降增大的规律^[22]。2015 年, 重庆大学的赖伟等人通过功率循环试验研究 IGBT 老化失效机理, 实时获取了功率循环过程中器件的导通压降如图 8 所示, 得到了导通压降随器件状态劣化而增加的结论, 并给出了具体的阈值判断器件键合线断裂的失效形式^[23]。U.M. Choi 测试了不同 IGBT 的导通压降, 器件失效时导通压降增高 10%^[24]。上述文章得到了导通压降与 PMI 状态的关系, 对于不同的试验方法可以得到不同的导通压降阈值, 目前标准中将

导通压降变化 5% 作为 PMI 键合线失效的阈值。

2) 结温的修正方法

对于不同封装结构的 IGBT, 导通压降(导通电阻)的演化不仅与劣化程度有关, 还与结温相关。因此, 在利用导通压降 U_{CE} 作为表征 IGBT 状态劣化程度的指标时, 需要修正结温的影响。2013 年, Hui Huang 等人使用 IGBT 的导通压降 U_{CE} 作为表征 PMI 键合线失效的表征量, 根据结温与导通压降 U_{CE} 的关系如式(1)所示, 式中 T_j 为平均虚拟结温。结温的修正公式如式(2)所示, 式中 U_{CE_modify} 为修正后的 IGBT 导通压降, T_{jmax} 为最大结温, $T_{jmax_initial}$ 为初始最大结温。最后得到了 IGBT 器件导通压降 U_{CE} 随功率循环次数的变化关系^[25]。

$$U_{CE} = 0.0056T_j + 2.37 \quad (1)$$

$$U_{CE_modify} = U_{CE} - 0.0056(T_{jmax} - T_{jmax_initial}) \quad (2)$$

文献[26-27]为了修正功率循环过程中结温波动对导通压降的影响, 提出在功率循环试验平台上通过流过大电流加速器件测试不同温度下续流二极管以及 IGBT 的伏安特性曲线, 并通过式(3)得到结温修正系数 K , 最后可以得到修正以后的 IGBT 导通压降与功率循环次数的关系曲线。式中 T_{j1} 和 T_{j2} 以及 U_{CE1} 、 U_{CE2} 分别为 IGBT 在两个不同时刻对应的虚拟结温和导通压降。

$$K = \left| \frac{T_{j2} - T_{j1}}{U_{CE2} - U_{CE1}} \right| \quad (3)$$

Arun Singh 等人在 2017 年提出了一种新的修正结温的方法^[28]。IGBT 器件的导通压降由二极管的压降和 MOSFET 压降两部分组成, 其中二极管具有负温度系数, MOSFET 有正温度系数。小电流条件下, IGBT 的温度特性主要由二极管的特性来控制; 而随着电流的增加, MOSFET 两端的压降将成为主导因素。这种特性如图 9 所示, 不同温度下伏安特性曲线的交点称为拐点。

电流在拐点处的特性只与硅片的特性有关, 而与 IGBT 的结温无关。IGBT 在功率循环过程中产生的热应力导致的封装结构劣化不会引起硅片特性的改变, 因此可以通过拐点处的电压监测 IGBT 封装结构状态劣化程度。但是在 MMC 子模块中 IGBT 的导通电流并不一定处于拐点电流处, 所以必须对结温进行修正。

3) 导通压降在线获取方法

对于 PMI 和 PPI 两种封装形式的 IGBT, 在利

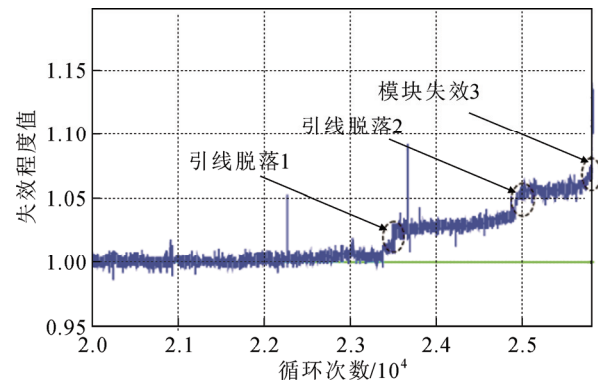


图 8 导通压降演化规律

Fig.8 Evaluation law of on-state voltage

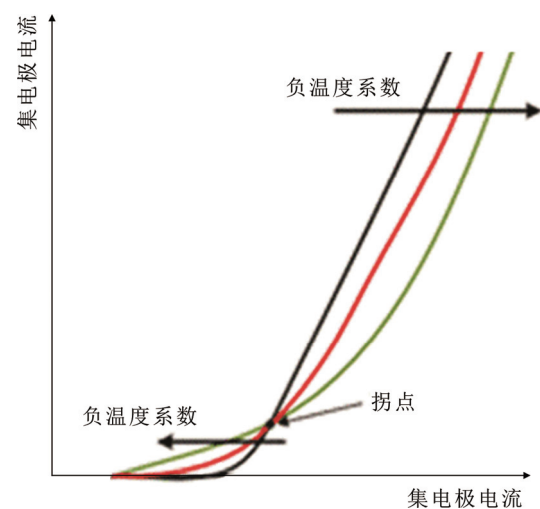


图 9 拐点

Fig.9 Inflection point

用导通压降 U_{CE} 作为状态劣化的指标时, 除了需要修正结温对导通压降的影响以外, 设计可靠的在线监测电路也是该方法的研究重点和难点。2018 年, U.M. Choi 等人总结了目前存在的 3 种电路, 分别如图 10 所示。图 10(a)是利用平行的 MOSFET 搭建的监测电路, 该电路的主要特点是除了可以监测指标器件状态的导通压降, 还可以通过监测小电流注入法下的导通压降得到器件结温, 但是该电路比较复杂且一旦平行的 MOSFET 无法有效连接将导致功率器件的短路; 图 10(b)是利用双二极管搭建的监测电路, 该电路结构简单, 但双二极管的形式可能会给测量结果带来误差; 图 10(c)所示的监测电路能够实现快速测量, 适合高切换频率的运行条件, 但是对于直流功率循环 MOSFET 必须以串联的形式联接^[29]。Asimakopoulos 等人在 2019 年提出了两种新的导通压降监测电路, 具备实现快速测量的功

能^[30]。MMC 中的 IGBT 在截止时承受 kV 级的高压，在导通时电压通常只有几伏，导致压降测试硬件电路需要同时满足高压隔离和测试精度两方面的要求，而且 MMC 中 IGBT 数量众多，测试硬件电路的费用很高。西安交通大学祝令瑜等人提出不附加传感器，利用桥臂电流电压信号以及控制信号、开关状态计算 IGBT 导通压降，实现 MMC 子模块 IGBT 导通压降自感知，但是该方法有待进一步实验验证^[31]。

针对导通压降不易测量的缺点，重庆大学 Pengju Sun 等人提出利用 IGBT 短路电流监测 PMI 键合线失效。PMI 老化引起的键合线断裂会导致内部寄生参数的变化而引起短路电流的减小，又由于温度对短路电流的影响相对较小，因此可以将短路电流作为键合线失效的表征量。但是短路电流的形成会产生极大的热功率，可能引起器件的过温失效，因此短路电流的测试需要限制在 2~5 μs 以内，该方法在 MMC 中的应用还需要进一步研究^[32]。

2.2 动态参量

IGBT 的动态电学参数主要包含开通关断过程中的导通压降 U_{CE} ，门极电压 U_{GE} ，导通电流 I_{CE} 和门极电流 I_{GE} 。利用门极电压波形作为表征 PMI 状态的表征量在 2011 年被提出，器件因过温引起的短路故障会引起门极电压米勒平台区域的显著变化，门极电压在故障和非故障下的状态如图 11 所示^[33]。门极电压的测试延迟时间仅为 3 μs，满足在线监测的条件。

开通和关断过程中的门极电流信号可以用来表征器件芯片潜在缺陷^[34]。器件内部寄生参数会因热机疲劳引起的结构变化而改变，从而导致器件在开关过程中门极电流的异常。PMI 器件开通门极电流波形在健康状态、引线缺陷和芯片缺陷 3 种状态下的波形如图 12 所示，芯片缺陷下的开通门极电流在峰值以及衰减阶段均发生明显变化，因此可以利用门极电流信号特性反映器件芯片缺陷。

门极电压的米勒平台时长与器件状态密切相关，西安交通大学王建华等人从米勒平台的定义与产生机理入手，利用器件开通过程中的门极电压波形计算米勒平台的持续时长，并提出根据米勒平台时长随器件状态劣化程度的演化规律评估器件状态的方法。根据特性试验结果发现，米勒平台与温度、电流以及电压均有关，在实际应用过程中需要修正器件运行状态对监测结果的影响^[35]。

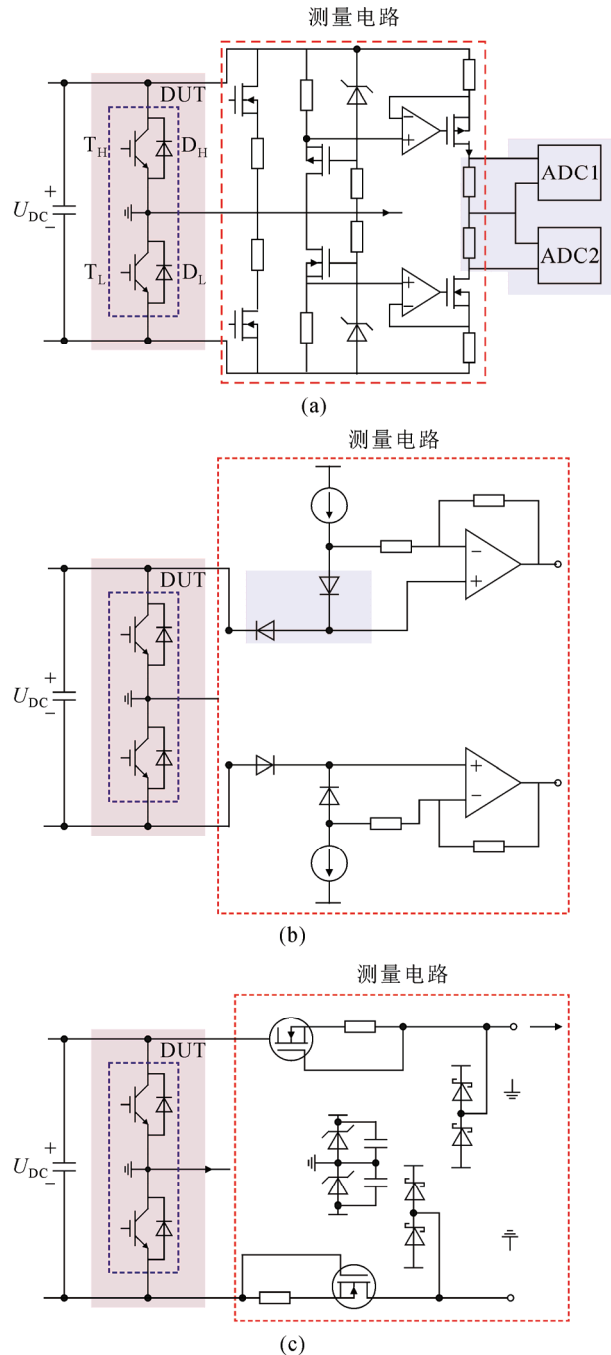


图 10 导通压降测量电路

Fig.10 Measurement circuit of on-state voltage

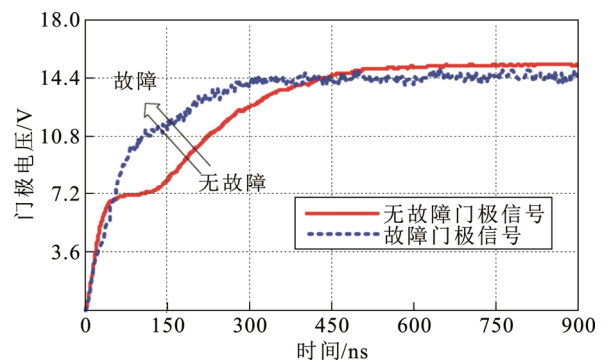


图 11 门极电压波形

Fig.11 Gate voltage waveform

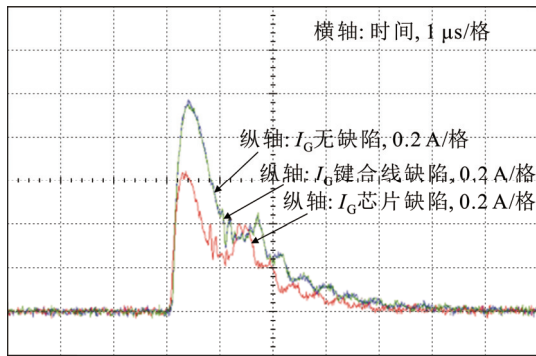


图 12 门极电流波形

Fig.12 Gate current waveform

其他动态参数还包含开通延迟时间和关断延迟时间, Douglas W. Brown 等人定义了关断延迟时间是器件在关断过程中 U_{CE} 从 10% 增加到 90% 的时长^[36]。器件的开通和关断时间可以用来检测芯片层的闭锁故障。目前, 基于动态电学参数的状态监测方法还不成熟, 在监测电路的分辨率以及测试精度、运行状态修正等方面都需要进一步研究。

MMC 子模块数量众多, 利用附加传感器的方法测试功率器件动静态电学参数用于状态监测不仅会导致成本增加而且存在传感器可靠性问题, 使得 MMC 的运行维护更加复杂。因此利用 MMC 运行特性以及控制信息在线自感知 IGBT 导通电阻是更加可行的方法。该方法的应用还需要得到多芯片并联的 PPI 整体器件导通电阻演化规律以及导通电阻的结温线性修正方法, 最终形成基于导通电阻的 MMC 子模块用 PPI 状态监测技术。

3 基于热学参量的状态特征量

3.1 结温

研究功率器件的结温实时获取方法对器件状态在线监测十分重要。首先, 器件状态的在线监测研究大多是基于对器件导通压降、门极电压、门极电流等电参量, 这些参数都是温度敏感型参数, 因此器件在运行过程中发生的结温波动对监测的结果有不可忽视的影响, 需要研究结温的在线获取技术, 对器件的状态表征量进行修正^[37]。其次, 根据器件劣化机制, 微动磨损同样会导致 PPI 热阻的变化, 因此利用功率循环过程中的稳态结温信息计算 PPI 热阻, 得到 PPI 稳态热阻演化规律对于器件状态监测十分重要^[38]。最后, 实时获取的结温参数本身就是器件的重要特性参数之一, 可以用来估算器 PPI 经历的冷热循环次数, 评估器件剩余寿命^[39]。目前

已有许多学者对这一部分研究内容进行了总结和综述^[37-40]。

目前的结温获取方法主要分为物理接触式测量法、光学非接触式测量法、热路模型预测法和热敏感电参数法^[41]。其中, 物理接触式测量利用热敏电阻或者热电偶等温感元件进行测试, 只能测得器件外部的平均温度, 难以实现结温的在线监测。光学非接触式测量对器件本身有损坏, 也不适用于结温在线监测。

热路模型预测法根据器件的工况实时计算功率损耗, 并利用功率损耗与结温的耦合关系进行迭代计算, 得到器件结温。热路网络充当传递函数的作用, 因此即使 PMI 和 PPI 的热路模型存在差异, 但是在进行结温计算时, 热路模型的方法具有通用性。

器件的功率损耗包括通态损耗和开关损耗。热路网络分为 Foster 模型和 Cauer 模型, Foster 模型可以通过瞬态热阻抗曲线拟合得到, Cauer 模型需要获取 IGBT 结构中材料的具体物理参数, 实现起来较为困难^[42]。热路网络是利用热路模型法获取结温的关键。热路网络的准确建立在于准确获取器件瞬态热阻抗曲线。可以通过实验的方法得到器件的升温或者降温曲线计算出瞬态热阻抗。也可以建立有限元仿真模型, 给定已知的功率损耗通过阶跃响应计算求得。

目前应用热路的方法预测结温的研究集中在如何利用器件运行参数搭建模型并提高计算速度和精度。利用功率损耗和器件 Foster 四阶热路网络计算结温是常用的方法^[43-44]。根据电热比拟理论, 利用电网络计算电压的方法模拟得到 IGBT 模块的结温迭代计算公式, 依据 Cause-Seidel 迭代算法可以计算出 IGBT 结温。结温迭代算法在保证精度的同时, 大大缩减了计算时间^[43]。河北工业大学的王希平等人根据柔性直流输电中 MMC 的拓扑结构、运行工况以及调制策略, 仿真计算了 MMC 子模块中不同位置处 IGBT 的电流波形, 并计算得到器件的平均功率。通过器件的四阶 Foster 热路网络模型, 计算得到器件结温波动。该方法计算速度是柔性直流输电系统时域仿真模型的 1 000 倍, 实现了动态结温的快速计算, 具有工程应用潜力^[44]。

考虑到一维的 Foster 热路网络只能计算单点的结温而实际上功率器件每层的结温是不是均匀分布的, 因此为了获取器件整体结温的分布, Bahman 等人提出了三维热路网络模型, 如图 13 所示。每层

上均匀分布 9 个区域, 可以同时通过三维热路网络计算得到芯片层的结温分布。显然, 仅依靠数据手册提供的瞬态热阻抗曲线不足以获取三维热路网络中的热阻和热容参数, 需要更多区域的瞬态热阻抗曲线信息。采用有限元计算的方法, 在给定功率损耗和边界条件下根据温度阶跃响应可以计算器件内部热场分布, 从而获取每一区域的瞬态热阻抗曲线, 解决三维热路网络的参数获取问题。在三维热阻抗网络的基础上, 根据实际运行过程中的电流、电压、频率以及壳温等参数就能建立功率损耗模型, 计算得到器件内部芯片层的温度分布^[45]。

PPI 属于双面散热, 芯片处产生的热量有从芯片到集电极以及从芯片到发射极两条传递通道, 其热路模型与 PMI 有所不同。Senturk 等人根据 PPI 的安装形式以及中性点钳位型三电平中压变频器的模型结构, 分析了 PPI 的功率损耗计算方法以及热阻模型, 计算得到不同位置 PPI 的结温^[46]。器件老化以后, 热路网络模型中的热阻抗参数将发生变化, 影响结温仿真计算结果的准确性。重庆大学陈民铀等人根据 IGBT 器件老化进程中损伤与热阻的线性关系, 利用热载荷曲线中结温的变化计算器件累积损伤, 当累积损伤每增加 20%时将 Foster 热网络中的热阻增加 10%, 获取器件老化过程中更加准确的结温信息^[47]。Zhen Hu 等人利用 PMI 基板温度梯度的变化作为焊接层老化的指标, 当热电偶监测到温度梯度的变化时, 根据热阻的线性变化规律计算真实热阻以更新热网络, 采用这种方法计算得到的器件结温误差大大减小^[48]。

以上综述了基于热网络在线计算结温的方法, 另外一个重要的结温监测方式是热敏电参数法。热敏电参数可以分为静态参数和动态参数两类型。静态参数主要有小电流饱和和压降法^[49], 门极阈值电压法^[50]和短路电流法^[51]等等。小电流饱和和压降法是比较成熟的方法, 小电流下的器件压降主要是由 pn 结的压降产生的, 器件封装层劣化对芯片 pn 结影响很小, 可以根据导通压降与结温的线性关系得到实际结温。小电流测试的电路如图 14 所示^[38], I_c 为功率循环电路中的直流电源; I_m 为小电流直流电源。小电流饱和和压降的灵敏度一般为 $2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, 在实际柔性直流工程中, 由于直流母线电压一般达到千伏级别, 导致测试的精度难以保证, 因此该方法多用于实验室中。

门极阈值电压与结温也呈现线性关系, 但是门

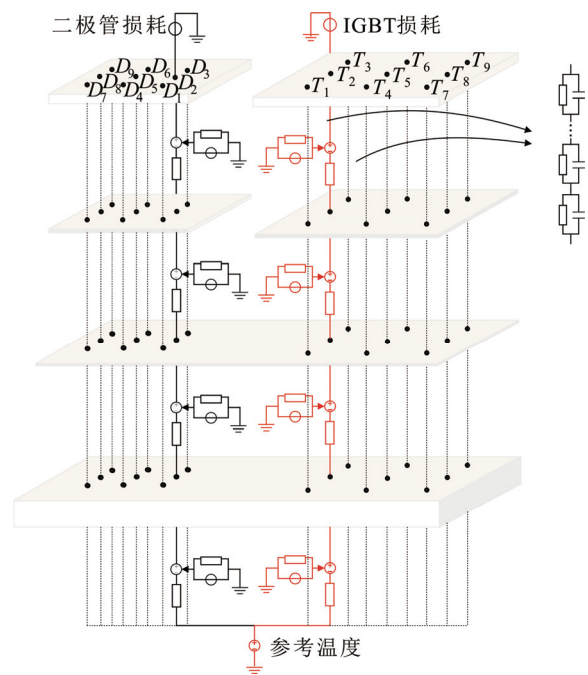


图 13 三维热阻抗网络

Fig.13 3D thermal impedance network

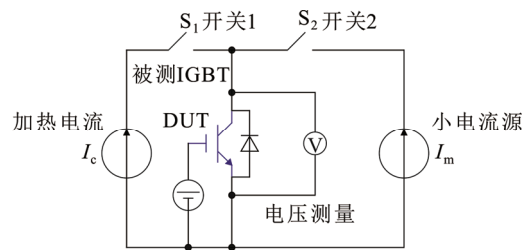


图 14 小电流压降测试电路

Fig.14 Voltage measurement circuit of small current

极阈值电压的定义是当集电极与发射极电流达到 $1\sim 10 \text{ mA}$ 时的门极电压, 实际应用过程中需要同步监测门极电压信号和集电极电流信号, 技术难度高且成本高, 一般也不用于在线监测^[50]。当使用短路电流作为热敏参数时, 需要额外设计短路测试环节, 侵入性强, 对待测器件的安全性存在潜在威胁, 难以实现在线提取^[51]。

动态参数包含器件开通关断过程中的门极电流, 门极电压等等。一般通过双脉冲测试方法得到门极信号, 提取如电压对电流变化率^[52], 关断延迟时间^[53], 开通米勒平台^[54], 关断米勒平台^[55]等参数作为热敏参数, 研究热敏参数与结温的关系及影响因素, 从灵敏度、在线测试难易度、精确度等方面评估其在线实现的可能。浙江大学常垚等人针对柔性直流输电用 PPI 开展了利用关断电流最大变化率

作为热敏参数监测结温的方法, 关断电流最大变化率具有负温度系数特性且线性度良好, 其热敏特性的灵敏度随着负载电流升高而升高^[56]。

利用动态热敏参数监测功率器件的结温主要问题在于, 动态热敏参数不仅与结温有关, 还与器件状态的劣化程度有关。器件状态劣化主要由运行过程中的热应力导致, 这一过程直接与结温相关, 同时器件状态劣化导致的热阻变化也会引起结温的波动, 因此状态劣化程度和结温之间存在耦合的关系。参数的解耦十分困难, 需要提出与器件状态劣化程度无关的参量监测器件结温。

利用门极内部电阻作为热敏参数获取结温与器件状态无关^[57]。在门极电压没有达到正向驱动电压之前, 也就是在开通延迟阶段, 门极驱动的 RLC 网络的如图 15 所示。其中, 外部门极电阻可以认为不随温度变化而变化, 门极电容在门极电压达到阈值电压之前保持不变, 门极电感在过阻尼的条件下可以忽略不计, 只有门极内部电阻是温感参数。理想情况下, 器件的开通过程是一个门极电压从负极性转换成正极性的阶跃过程, 此时一阶响应产生的门极电流峰值就与温变的内部电阻相关。

门极电流信号的直接测试是困难的, 在门极设置外部电阻, 通过测试外部电阻两端的压降可以得到门极电流信号, 进而通过公式计算得到门极内部电阻。试验得到的门极内部电阻与结温的线性关系如图 16 所示。利用小电流饱和压降法和红外测温法的试验结果与门极内部电阻法的试验结果进行对比, 发现门极内部电阻法监测门极部分区域的平均温度更为准确, 且其结果与 PMI 器件的键合线断裂无关, 也就是说器件在热老化的过程中, 用门极内部电阻作为热敏参数测量结温可以忽略封装结构的老化给测试结果带来的影响, 适用于器件结温的实时在线获取^[58]。该方法的缺点在于灵敏度较低, 且器件开通过程的门极电压信号不是严格的阶跃信号, 存在一定的误差, 因此基于门极内部电阻的结温监测方法还需要进一步的深入研究。

Yingzhou Peng 等人利用器件关断过程中的门极电压峰值信号作为热敏参数获取结温, 得到了门极压降 U_{gE-np} 与结温的线性关系, 该方法的优点同样在于键合线断裂对其测试结果没有影响, 且灵敏度达到 $76 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, 适合用于在线监测中。导通压降 U_{CE} 和流过 IGBT 的电流 I_d 对 U_{gE-np} 均能产生影响, 在实际应用的过程中需要对其进行修正^[59]。

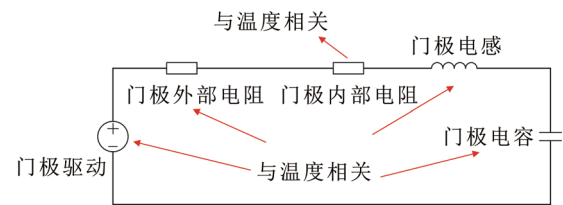


图 15 门极驱动 RLC 网络

Fig.15 Gate driver RLC network

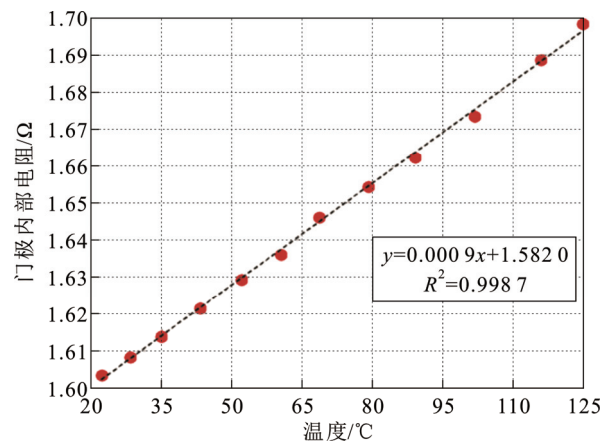


图 16 门极内部电阻与结温关系

Fig.16 The relation between gate internal resistance and junction temperature

MMC 子模块高压 PPI 的结温获取同样存在传感器数量较多导致的成本以及可靠性问题, 因此采用热路模型法是更加可行的技术路线。用于热路模型法中的损耗模型与热模型建立的参数均可来自器件参数表 and 控制器中的信息, 无需附加多余的传感器, 具有实现 MMC 子模块 PPI 结温在线自感知的潜力。

3.2 热阻

IGBT 热阻是一种常用的器件老化状态监测参量。IGBT 在老化过程中封装层热阻会因为热胀冷缩的循环应力作用而变化, 例如 PMI 的热阻就会由于封装内部焊接疲劳及其造成的各物理层之间焊接层裂缝导致封装热阻逐渐增大。研究中将热阻值变化 20% 作为焊接层疲劳的判断阈值^[60]。Mohd. Amir Eleffendi 在 PMI 的功率循环试验过程测试器件瞬态热阻抗曲线, 并根据瞬态热阻抗曲线得到器件稳态热阻随其状态劣化的演化规律, 如图 17 所示。PMI 焊接层老化引起热阻增加, 因此可以通过测试稳态结温获取器件热阻反映其老化状态。目前缺乏 PPI 整体器件稳态热阻的演化规律。总的来说, PPI 器件的结温与热阻是紧密联系的, 如何在器件全寿命周期过程中获得准确的结温和热阻是利用热学参数

监测功率器件状态的关键^[61]。

4 基于绝缘参量的状态特征量

随着换流器运行电压的逐渐升高,对 IGBT 功率器件耐受电压的要求也日益提高,IGBT 的绝缘问题因此十分突出^[62]。

目前针对 PPI 内部封装结构绝缘状态的研究较少,现有文献均对 PMI 内部硅胶填充介质绝缘缺陷的检测开展研究。绝缘性能的检测手段主要分为 3 类:泄露电流,介电响应以及局部放电。PMI 内部填充硅胶作为绝缘介质,在器件长期运行后,硅胶由于电热效应发生老化导致绝缘性能降低甚至出现缺陷,因此可以利用硅胶介质的介电谱评估器件的状态。Arumugam 等人测试得到不同老化状态下 PMI 的宽频介电响应谱,发现器件电容和介损的频谱在 0.1 Hz 到 1 000 Hz 频段内的信息可以反映介质老化状态,因此可以利用介电谱信息检测器件硅胶介质绝缘缺陷,高电压输入下的介损和电容测试结果分别如图 18 所示^[63]。利用介电谱评估功率器件绝缘缺陷以及状态劣化程度的方法思路较为新颖,但是目前该方法的研究不够深入,需要进一步研究器件电容和介损的演化机理以及测试误差。

相较于介电响应测试的研究,利用局部放电检测的方法评估 PMI 绝缘性能的研究更充分。目前主要有两种加压方法,一种是按照标准 IEC 61287-1 的要求施加工频交流电压,交流电压的施加时间与有效值如图 19 所示。该加压方法需将器件集电极,发射极和门极短接,在三级短接处和器件基板之间加压,测试器件的局部放电信号。另一种加压方法是将器件门极短路或者施加关断电压保持器件可靠关断,然后在集电极和发射极之间施加交直流叠加电压,同时需要保证直流反偏电压高于交流电压防止器件内部续流二极管承受正向电压而导通。对于 PPI 这种压接式封装结构的器件来说,显然不能够使用三极短接的方法加压,只能采用第 2 种加压方式。在加压的同时,必须使用可靠的夹具保证器件在加压过程中可靠压接,能够耐受一定等级的测试电压。

Lebey 等人采用两种加压方法测试得到了 PMI 在不同电压等级下的局部放电 PRPD 谱图和放电量,从空间放电,电晕放电和沿面放电 3 个维度研究了 PMI 封装层和芯片的放电形式,并根据不同绝缘缺陷局部放电特征对器件不同位置的放电进行分

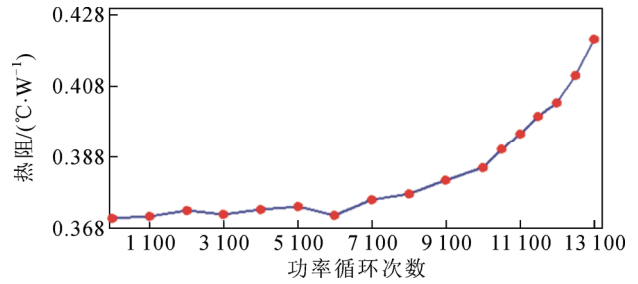


图 17 稳态热阻的演化规律

Fig.17 The evaluation law of steady thermal resistance

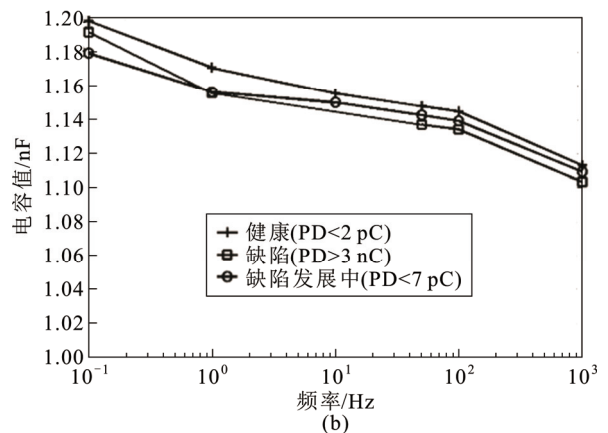
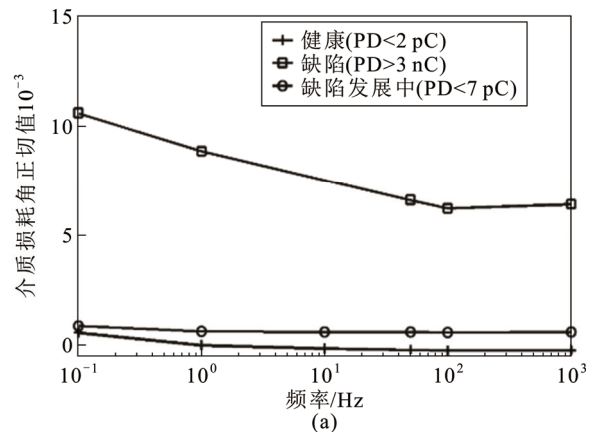


图 18 介电响应测试结果

Fig.18 Dielectric response test results

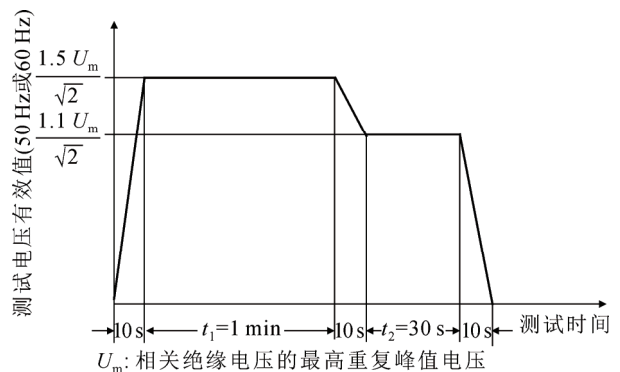


图 19 IEC 61287-1 局部放电测试方法

Fig.19 IEC 61287-1 for PD test

类^[64]。Arumugam 等人利用第 1 种加压方式测试了不同老化程度下 PMI 的局部放电, 利用 PRPD 谱图信息和局部放电量判别 PMI 器件状态劣化程度。文中指出利用器件局放信号的频域信息评估器件状态是敏感度更高的绝缘检测手段^[63]。Romano 等人采用三极短路的形式施加电压, 比较了工频交流电压和 PWM 调制电压作用于器件上对局放检测的区别, 得出了用 PWM 调制电压更有利于准确检测器件绝缘缺陷的结论^[65]。付鹏宇等人测试了不同直流电压下 IGBT 模块局部放电的脉冲电流和电压, 结合波形分析技术, 提出可以用脉冲电流持续时间和半峰值时间等参数对器件不同类型的局部放电进行识别^[66]。

PPI 利用内部填充惰性气体作为绝缘介质, 存在漏电和放电两类绝缘问题。华北电力大学的付鹏宇等人从绝缘测试、物理分析和可靠设计 3 个维度研究了 PPI 的绝缘问题, 指出利用局部放电信息作为器件的绝缘缺陷检测手段非常有用^[67]。为了研究 PPI 的绝缘性能, 付鹏宇等人建立了 PPI 子模块有限元模型, 计算了直流电压下其内部电场分布, 发现 PPI 的银片层、PEEK 和芯片之间以及 PEEK 框架结构的表面是场强较大区域^[68]。通过对 PPI 内部子单元开展局部放电特性测试, 得到了器件内部子单元的局部放电 PRPD 谱图特征^[69]。用局部放电检测的手段来评估器件的绝缘缺陷是一个有效的手段, 但是目前没有得到多芯片 PPI 器件整体的局部放电特征, 也没有得到 PPI 器件在状态劣化过程中局部放电特征的演化规律, 研究尚不充分。

5 结论

目前针对柔性直流输电用高压 IGBT 状态监测的研究尚不充分, 从劣化机理和状态监测两个方面都需要开展大量工作, 可以从以下几个方面开展针对性研究。

1) 压力的均匀分布对于 PPI 在换流阀中的可靠运行具有重要的意义, 器件在长期运行过程中会由于内部“电-热-机”多物理场作用下的复合应力导致内部压力分布不均匀, 引发器件微动磨损与局部接触。借助有限元仿真的方法获得器件在健康与劣化状态下的热机应力分布, 结合功率循环试验以后的器件内部显微观测结果, 提出器件在全寿命周期过程中的内部状态劣化机制, 建立器件状态表征量与状态劣化机理之间的联系。

2) 目前缺乏内部多芯片并联的 PPI 整体器件导通电阻、稳态热阻、局部放电等关键电热参数的演化规律, 无法为 MMC 子模块高压 PPI 状态监测提供支撑。需要开展进一步研究获取高压 PPI 的参数演化规律。

3) MMC 子模块数量众多, 利用附加传感器方法测试 IGBT 器件动静态电学参数用于状态监测存在成本和可靠性问题。因此利用 MMC 子模块运行特性以及控制器信息在线自感知 MMC 子模块 IGBT 导通电阻与结温是更加有效的方法。该方法需要解决控制器中电压电流信息测试干扰对计算结果的影响。

4) PPI 状态劣化至失效的过程与内部机械结构的变化紧密相关, 而在运行过程中, 器件内部机械结构的变化会反映为电场分布的变化, 必然伴随着局部放电的现象。不同的机械结构缺陷对应不同的局部放电形式, 不同的缺陷程度也可以由局部放电特征所反映。因此可以利用 PPI 或者 PMI 的局部放电特征演化规律监测 MMC 子模块 IGBT 状态。在 MMC 拓扑结构中, IGBT 与子模块电容器并联, 与脉冲电流法测试局部放电的试验电路相似, 为在 MMC 运行过程中实现器件局部放电在线自感知奠定了硬件基础。因此, 通过研究器件局部放电发生和演化机理, 掌握局部放电特性随器件状态劣化程度的演化规律, 提出器件局部放电在线获取方法, 可以形成基于局部放电特性的柔性直流输电用高压 IGBT 状态监测技术。

参考文献 References

- [1] 喻涓霖, 魏晓光, 齐 磊, 等. 混合式高压直流断路器用 IGBT 功能模型[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2472-2479.
YU Meiji, WEIXiaoguang, QI Lei, et al. IGBT function model hybrid HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2472-2479.
- [2] 雷万钧, 刘进军, 吕高泰, 等. 大容量电力电子装备关键器件及系统可靠性综合分析与评估方法综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3353-3361.
LEI Wanjun, LIU Jinjun, LÜ Gaotai, et al. Review of reliability comprehensive analysis and evaluation methods for key components and system of large capacity power electronic equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3353-3361.
- [3] 王 冰, 张 杰, 钟和清, 等. 柔性直流输电用直流电压测量装置暂态响应试验研究与装置研制[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3830-3836.
WANG Bing, ZHANG Jie, ZHONG Heqing, et al. Study and development of transient response test system of DC voltage measuring device for VSC-HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3830-3836.

- [4] 王渝红, 傅云涛, 曾琦, 等. 柔性直流电网故障保护关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2362-2374.
WANG Yuhong, FU Yuntao, ZENG Qi, et al. Review on key technology for fault protection of flexible DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2362-2374.
- [5] 张宇娇, 范虹兴, 张炫焜, 等. 柔性直流输电换流阀用 IGBT 模块焊料层疲劳寿命研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3381-3389.
ZHANG Yujiao, FAN Hongxing, ZHANG Xuankun, et al. Fatigue: life analysis of IGBT module solder layer for VSC-HVDC valve[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3381-3389.
- [6] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2016: 14-19.
XU Zheng. VSC-HVDC transmission system[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Machine Press, 2016: 14-19.
- [7] YANG S, XIANG D, BRYANT A, et al. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(11): 2734-2752.
- [8] OH H, HAN B, MCCLUSKEY P, et al. Physics-of-failure, condition monitoring, and prognostics of insulated gate bipolar transistor modules: a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2413-2426.
- [9] WANG B, CAI J, DU X, et al. Review of power semiconductor device reliability for power converters[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2017, 2(2): 101-117.
- [10] 邓二平, 张经纬, 李尧圣, 等. 焊接型 IGBT 模块与压接型 IGBT 器件可靠性差异分析[J]. 半导体技术, 2016, 41(11): 801-810.
DENG Erping, ZHANG Jingwei, LI Xiaosheng, et al. Analysis of the reliability difference between IGBT modules and press-pack IGBTs[J]. Semiconductor Technology, 2016, 41(11): 801-810.
- [11] 赵志斌, 邓二平, 张朋, 等. 换流阀用与直流断路器用压接型 IGBT 器件差异分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 129-137.
ZHAO Zhibin, DENG Erping, ZHANG Peng, et al. Review of the difference between the press pack IGBT using for converter valve and for DC breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 129-137.
- [12] GOPIREDDY L, TOLBERT L M, OZPINECI B, et al. Power cycle testing of power switches: a literature survey[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(5): 2465-2473.
- [13] 石巍. 大功率 IGBT 模块健康状态信息提取方法研究及加速老化试验平台研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 5-6.
SHI Wei. Research on state-of-health extraction method of high power IGBT modules and design of the accelerated aging test platform system[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2018: 5-6.
- [14] DENG E, ZHAO Z, XIN Q, et al. Analysis on the difference of the characteristic between high power IGBT modules and press pack IGBTs[J]. Microelectronics Reliability, 2017, 78(3): 25-37.
- [15] TINSCHERT L, RYGG RA, POLLER T, et al. Possible failure modes in press-pack IGBTs[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(6): 903-911.
- [16] POLLER T, BASLER T, HERNES M, et al. Mechanical analysis of press-pack IGBTs[J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(9/10): 2397-2402.
- [17] DENG E, ZHAO Z, LIN Z, et al. Influence of temperature on the pressure distribution within press pack IGBTs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 6048-6059.
- [18] LAI W, LAI W, CHEN H L M, et al. Investigation on the effects of unbalanced clamping force on multi-chip press pack IGBT modules[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(4): 2314-2322.
- [19] SMET V, FOREST F, HUSELSTEIN J, et al. Evaluation of Vcemonitoring as a real-time method to estimate aging of bond wire-IGBT modules stressed by power cycling[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2760-2770.
- [20] 江泽申. 压接式 IGBT 器件功率循环试验及寿命预测[D]. 重庆: 重庆大学, 2018: 43-45.
JIANG Zeshen. Power cycling test and lifetime modelling of press-pack IGBT[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2018: 43-45.
- [21] JI B, PICKERT V, CAO W, et al. In situ diagnostics and prognostics of wire bonding faults in IGBT modules for electric vehicle drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5568-5577.
- [22] 唐勇, 汪波, 陈明, 等. 高温下的 IGBT 可靠性与在线评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 17-23.
TANG Yong, WANG Bo, CHEN Ming, et al. Reliability and on-line evaluation of IGBT modules under high temperature[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 17-23.
- [23] 赖伟, 陈民铀, 冉立, 等. 老化试验条件下的 IGBT 失效机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5293-5300.
LAI Wei, CHEN Minyou, RAN Li, et al. Analysis of IGBT failure mechanism based on aging experiments[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5293-5300.
- [24] CHOI U, BLAABJERG F, MUNK-NIELSEN S, et al. Reliability improvement of power converters by means of condition monitoring of IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 7990-7997.
- [25] HUANG H, MAWPY P A. A lifetime estimation technique for voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(8): 4113-4119.
- [26] GHIMIRE P, DE VEGA A R, BECZKOWSKI S, et al. An online Vce measurement and temperature estimation method for high power IGBT module in normal PWM operation[C]//IEEE Power Electronics Conference. [S.l.]: IEEE, 2014.
- [27] GHIMIRE P, VEGA A R D, BECZKOWSKI S, et al. Improving power converter reliability: online monitoring of high-power IGBT modules[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014, 8(3): 40-50.
- [28] SINGH A, ANURAG A, ANAND S. Evaluation of Vce at inflection point for monitoring bond wire degradation in discrete packaged IGBTs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 2481-2484.
- [29] CHOI U, BLAABJERG F, JØRGENSEN S, et al. Power cycling test methods for reliability assessment of power device modules in respect to temperature stress[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 33(3): 2531-2551.
- [30] ASIMAKOPOULOS P, PAPASTERGIOU K D, THIRINGER T, et al. On Vce method: in-situ temperature estimation and aging detection of high-current IGBT modules used in magnet power supplies for particle accelerators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 551-560.
- [31] CHEN S, JI S, PAN L, et al. An on-state voltage calculation scheme of MMC submodule IGBT[J]. IEEE Transactions on Power Electron, 2019, 34(8): 7996-8007.
- [32] SUN P, GONG C, DU X, et al. Condition monitoring IGBT module bond wires fatigue using short-circuit current identification[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3777-3786.
- [33] RODRIGUEZ-BLANCO M A, CLAUDIO-SANCHEZ A, THEILLIOL D, et al. A failure-detection strategy for IGBT based on gate-voltage behavior applied to a motor drive system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1625-1633.

- [34] ZHOU S, ZHOU L, SUN P. Monitoring potential defects in an IGBT module based on dynamic changes of the gate current[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(3): 1479-1487.
- [35] LIU J, ZHANG G, CHEN Q, et al. In situ condition monitoring of IGBT based on miller plateau duration[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(1): 769-782.
- [36] BROWN D W, ABBAS M, GINART A, et al. Turn-off time as an early indicator of insulated gate bipolar transistor latch-up[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 479-489.
- [37] 王莉娜, 邓 洁, 杨军一, 等. Si 和 SiC 功率器件结温提取技术现状及展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 703-716.
WANG Lina, DENG Jie, YANG Junyi, et al. Junction temperature extraction methods for Si and SiC power devices—areview and possible alternatives[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 703-716.
- [38] 李武华, 陈玉香, 罗皓泽, 等. 大容量电力电子器件结温提取原理综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3546-3557.
LI Wuhua, CHEN Yuxiang, LUO Haoze, et al. Review and prospect of junction temperature extraction principle of high power semiconductor devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3546-3557.
- [39] BAKER N, LISERRE M, DUPONT L, et al. Improved reliability of power modules: a review of online junction temperature measurement methods[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014, 8(3): 17-27.
- [40] SATHIK M, SUNDARARAJAN P, SASONGKO F, et al. Comparison of IGBT junction temperature measurement and estimation methods—a review[C]//2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT). [S.l.]: IEEE, 2017.
- [41] 罗皓泽. 基于动态热敏电参数法的大容量 IGBT 模块结温在线提取原理和方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 9-12.
LUO Haoze. On-line junction temperature extraction for high power IGBT modulus with dynamical temperature sensitive electrical parameters (DTSEPs)[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University. 2015: 9-12.
- [42] 申海东, 解 江, 吴雪珂, 等. 考虑热效应的 IGBT 热网络模型建模方法[J]. 半导体技术, 2018, 43(12): 898-904.
SHEN Haidong, XIE Jiang, WU Xueke, et al. IGBT thermal network modeling method considering thermal effect[J]. Semiconductor Devices, 2018, 43(12): 898-904.
- [43] 李志刚, 李 雄, 张 强, 等. SPWM 模式下逆变器中 IGBT 结温的快速评估方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3683-3689.
LI Zhigang, LI Xiong, ZHANG Qiang, et al. Rapid assessment method of IGBT junction temperature in inverter under sinusoidal pulse width modulation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3683-3689.
- [44] 王希平, 李志刚, 姚 芳. 模块化多电平换流阀 IGBT 器件功率损耗计算与结温探测[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1636-1646.
WANG Xiping, LI Zhigang, YAO Fang. Power loss calculation and junction temperature detection of IGBT devices for modular multilevel valve[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1636-1646.
- [45] BAHMAN A S, MA K, BLAABJERG F. A lumped thermal model including thermal coupling and thermal boundary conditions for high power IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2518-2530.
- [46] SENTURK O S, HELLE L, MUNK-NIELSEN S, et al. Converter structure-based power loss and static thermal modeling of the press-pack IGBT three-level ANPC VSC applied to multi-MW wind turbines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(6): 2505-2515.
- [47] 陈民铀, 陈一高, 高 兵, 等. 考虑老化进程对热参数影响的 IGBT 模块寿命评估[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5427-5436.
CHEN Minyou, CHEN Yigao, GAO Bing, et al. Lifetime estimation of IGBT module considering influence of aging process on thermal parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5427-5436.
- [48] HU Z, DU M, WEI K, et al. An adaptive thermal equivalent circuit model for estimating the junction temperature of IGBTs[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(1): 392-403.
- [49] AVENAS Y, DUPONT L, KHATIR Z. Temperature measurement of power semiconductor devices by thermo-sensitive electrical parameters—a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(6): 3081-3092.
- [50] VEMULAPATI U R, BIANDA E, TORRESIN D, et al. A method to extract the accurate junction temperature of an IGCT during conduction using gate-cathode voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5900-5905.
- [51] XU Z X, XU F, WANG F. Junction temperature measurement of IGBTs using short-circuit current as a temperature-sensitive electrical parameter for converter prototype evaluation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3419-3429.
- [52] 罗毅飞, 汪 波, 刘宾礼, 等. 基于电压对电流变化率的 IGBT 结温变化机理及监测方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 44-49.
LUO Yifei, WANG Bo, LIU Binli, et al. Junction temperature variation mechanism and monitoring method of IGBTs based on derivative of voltage to current[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 44-49.
- [53] 孙鹏飞, 罗皓泽, 董玉斐, 等. 基于关断延迟时间的大功率 IGBT 模块结温提取方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3366-3372.
SUN Pengfei, LUO Haoze, DONG Yufei, et al. Junction temperature extraction of high power IGBT module based on turn-off delay time[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3366-3372.
- [54] 彭英舟, 周锥维, 孙鹏菊, 等. 基于开通米勒平台电压的 IGBT 模块结温估计研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3254-3262.
PENG Yingzhou, ZHOU Luowei, SUN Pengju, et al. Study of IGBT junction temperature estimation based on turn-on Miller platform voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3254-3262.
- [55] LIU J, ZHANG G, QIAN C, et al. Online junction temperature extraction and aging detection of IGBT via Miller plateau width[J]. Conference Proceedings-IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC. [S.l.]: IEEE, 2018.
- [56] 常 垚, 陈玉香, 李武华, 等. 基于关断电流最大变化率的压接式 IGBT 模块结温提取方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 70-78.
CHANG Yao, CHEN Yuxiang, LI Wuhua, et al. Junction temperature extraction with maximum collector current falling rate during turn-off for press-pack IGBT modules[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 70-78.
- [57] BAKER N, MUNK-NIELSEN S, IANNUZZO F, et al. IGBT junction temperature measurement via peak gate current[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3784-3793.
- [58] BAKER N, DUPONT L, MUNK-NIELSEN S, et al. IR camera validation of IGBT junction temperature measurement via peak gate current[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 3099-3111.
- [59] PENG Y, ZHOU L, DU X, et al. Junction temperature estimation of IGBT module via a bond wires lift-off independent parameter V_{gE-np} [J]. IET Power Electronics, 2018, 11(2): 320-328.
- [60] XIANG D, RAN L, TAVNER P, et al. Monitoring solder fatigue in a power module using case-above-ambient temperature rise[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(6): 2578-2591.

- [61] ELEFFENDI M A, JOHNSON C M. In-service diagnostics for wire-bond lift-off and solder fatigue of power semiconductor packages[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 7187-7198.
- [62] GHASSEMI M. PD measurements, failure analysis, and control in high-power IGBT modules[J]. High Voltage, 2018, 3(3): 170-178.
- [63] ARUMUGAM S, GORCHAKOV S, SCHOENEMANN T. Dielectric and partial discharge investigations on high power insulated gate bipolar transistor modules[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 1997-2007.
- [64] LEBEY T, MALEC D, DINCOLESCU S, et al. Partial discharges phenomenon in high voltage power modules[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4): 810-819.
- [65] ROMANO P, VIOLA F, MICELI R, et al. Partial discharges on IGBT modules: Are sinusoidal waveforms sufficient to evaluate behavior?[C] // IEEE Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 2014.
- [66] FU P Y, ZHAO Z, CUI X, et al. Partial discharge measurement and analysis in high voltage IGBT modules under DC voltage[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(4): 513-523.
- [67] 付鹏宇, 赵志斌, 崔翔. 压接型 IGBT 器件绝缘研究: 问题与方法[J]. 电力电子技术, 2018, 52(8): 38-40, 62.
FU Pengyu, ZHAO Zhibin, CUI Xiang. Study of the electrical insulation of press pack IGBT: problems and methodologies[J]. Power Electronics, 2018, 52(8): 38-40, 62.
- [68] FU P Y, ZHAO Z, CUI X, et al. Electrical field analysis of press-pack IGBTs[C] // 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Xi'an, China: [s.n.], 2017: 1-3.
- [69] FU P Y, ZHAO Z, LI X et al. Partial discharge measurement and analysis in PPIs[J]. IET Power Electronic, 2019, 12(1): 138-146.



祝令瑜(通信作者)

1988—, 男, 博士, 副教授, 博导
主要从事电力设备振动与噪声、直流电弧特性与检测、电力设备状态监测及故障诊断、新能源设备服役特性及状态评估
E-mail: zhuly1026@xjtu.edu.cn

ZHU Lingyu
Ph.D.

Associate professor
Corresponding author



占 草

1993—, 男, 博士生
主要从事功率器件可靠性分析、电力电子化电力设备状态监测方面的研究工作
E-mail: zhancao@stu.xjtu.edu.cn

ZHAN Cao
Ph.D. candidate

刘琛硕

1995—, 男, 硕士生
主要从事功率器件状态监测方面的研究工作
E-mail: liuchenshuo123@stu.xjtu.edu.cn

LIU Chenshuo



代建港

1997—, 男, 硕士生
主要从事 IGBT 状态监测方面的研究工作
E-mail: dai844239399@stu.xjtu.edu.cn

DAI Jianguang



汲胜昌

1976—, 男, 博士, 教授, 博导
研究方向为电力设备状态监测及故障诊断; 电力设备振动与噪声、新能源设备服役特性及状态评估
E-mail: jsc@xjtu.edu.cn

JI Shengchang
Ph.D., Professor

收稿日期 2019-11-15 修回日期 2020-11-10 编辑 陈 蔓