

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220520

模块化多电平换流器 IGBT 模块失效机理和状态监测研究综述

阳同光^{1,2}, 沈兵^{2,3}

(1. 湖南城市学院机械与电气工程学院, 湖南 益阳 413000; 2. 智慧城市能源感知与边缘计算湖南省重点实验室, 湖南 益阳 413000; 3. 南华大学电气工程学院, 湖南 衡阳 421200)

摘要: 全控型绝缘栅双极晶体管(insulated gated bipolar transistor, IGBT)模块作为模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的核心功率器件, 其失效机理研究和状态监测技术对保证 MMC 的运行可靠性具有重要意义。IGBT 模块劣化引起的运行参数失真和内部结构异常将严重影响 MMC 的工作性能。目前 IGBT 模块状态监测综述较多, 但缺乏对 MMC 中 IGBT 模块状态监测的相关总结。首先分析了 MMC 的结构特性与工作原理。然后根据焊接式和压接式两种类型 IGBT 的失效机理, 总结了 IGBT 模块的状态监测技术, 并补充了 MMC 子模块中 IGBT 模块的状态监测方法并进行分析。最后针对目前研究中存在的不足, 结合当下的研究现状, 展望了未来柔性直流输电系统中 IGBT 模块状态监测与评估的研究方向。

关键词: 柔性直流输电; MMC; IGBT 模块; 失效机理; 状态监测

Review of failure mechanism and state monitoring technology for modular multilevel converter IGBT modules

YANG Tongguang^{1,2}, SHEN Bing^{2,3}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Smart City Energy Perception and Edge Computing, Yiyang 413000, China; 3. School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421200, China)

Abstract: As the core power device of a modular multilevel converter (MMC), the failure mechanism study and condition monitoring technology of insulated gated bipolar transistor (IGBT) modules is of great significance in ensuring operational reliability. Distortion of operating parameters and internal structural abnormalities caused by IGBT module deterioration will seriously affect the working performance of an modular multilevel converter (MMC). At present, there are many reviews of IGBT modules status monitoring, but there is a lack of relevant summaries of IGBT module status monitoring in an MMC. First, the structural characteristics and working principle of an MMC are analyzed. Then, according to the failure mechanism of power-module and press-pack type IGBT, the state monitoring technology of the IGBT modules is summarized, and the state monitoring method of the IGBT modules in the MMC sub-module is supplemented and analyzed. Finally, in view of the shortcomings in current research, combined with the current research status, the research direction is suggested for IGBT module condition monitoring and evaluation in a flexible HVDC transmission system.

This work is supported by the Key Research and Development Program of Hunan Provincial Department of Science and Technology (No. 2021GK2020).

Key words: flexible HVDC transmission; MMC; IGBT module; failure mechanism; condition monitoring

0 引言

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)由于其输出谐波低、快速可控和延展性强等

优点, 较传统换流器更适用于高电压大功率传输, 是柔性直流输电系统的核心装置^[1-3]。全控型绝缘栅双极晶体管(insulated gated bipolar transistor, IGBT)具有开关频率高、驱动简单、功率容量大、热稳定性好等优点, 被广泛应用于模块化多电平换流器。IGBT 模块在模块化多电平换流器内数量庞大、水路和散热器分布复杂, 且长期处于低开关频率的工

基金项目: 湖南省科技厅重点研发计划项目资助(2021GK2020); 湖南省自然科学基金项目资助(2021JJ30079)

作状态和恶劣的外部运行环境, 伴随运行年限的增加, 在内部电热效应的持续冲击下, 发生由老化到失效的参数性故障, 使其成为故障发生率最高的器件^[4]。据行业调查报告显示, 电力电子换流器系统故障的 39%可归因于 IGBT 模块的故障和损坏, 而 IGBT 模块及其驱动器的故障占系统故障的 50%以上^[5-6]。因此, IGBT 模块作为模块化多电平换流器中最重要的器件之一, 对其运行状态进行实时监测及时获取其运行状态信息, 对 IGBT 模块的可靠性评估和寿命预测, 以及保证模块化多电平换流器乃至整个柔性直流输电系统的稳定运行都有着重大意义。

1 MMC 工作原理

MMC 根据梯形波逼近正弦波的工作原理, 采用一定的调制方法, 使子模块按正弦波形式输入, 通过调整桥臂上子模块的导通数量, 继而输出最接近的桥臂参考电压^[7]。理论上, MMC 子模块数量越多, 则输出的电压等级越高, 以渝鄂联网背靠背柔性直流输电工程为例, 每个桥臂子模块数量约为 540 个(含冗余装置 40 个), 一个三相 MMC 就含有近 3240 个子模块, 因此子模块是 MMC 极其重要的部分, MMC 的运行可靠性与其密切相关^[8]。

MMC 的电路拓扑图如图 1 所示, 其中, U_{dc} 为直流侧的输出电压, I_{dc} 为直流侧的输出电流, 每个桥臂的电压值为 $U_{dc}/2$ 。如图 1 可知, MMC 由三相共 6 个桥臂组成, 每相包含上、下两个桥臂, 上、下两个桥臂的中点接入交流端, 上、下两个桥臂串联直接接入直流端, 而每个桥臂由 N 个 SM 模块与一个阻抗器级联而成, 可最多输出 $N+1$ 个电平^[9]。

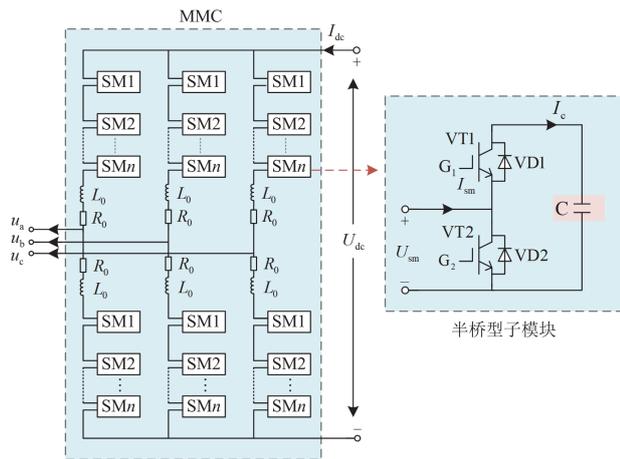


图 1 MMC 电路拓扑结构图

Fig. 1 MMC circuit topology diagram

由于 MMC 中 3 个相单元具有严格的对称性, 相单元中的上、下两个桥臂同样也具有严格的对称

性, 以 a 相为例。a 相上、下桥臂电压和电流可分别表示为式(1)和式(2)所示。

$$\begin{cases} u_{a1} = \frac{1}{2}U_{dc} - u_a \\ u_{a2} = \frac{1}{2}U_{dc} + u_a \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_{a1} = \frac{1}{3}I_{dc} + \frac{1}{2}i_a \\ i_{a2} = \frac{1}{3}I_{dc} - \frac{1}{2}i_a \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_{a1} 和 u_{a2} 分别为上、下桥臂电压; u_a 为交流侧输出电压; i_{a1} 和 i_{a2} 分别为上、下桥臂电流; i_a 交流侧输出电流。

MMC 子模块根据器件种类和排列方式的不同, 分为多种结构, 一般包括半桥型 SM 模块、全桥型 SM 模块和级联两电平型 SM 模块, 不过由于应用范围、成本以及占有空间等因素, 在柔性直流输电系统中多采用半桥型子模块^[10]。由图 1 中半桥子模块拓扑图可知, 每个 MMC 子模块 SM 由一个电容器 C 并联两个串联的 IGBT(VT1, VT2), 其中每个 IGBT 反并联一个续流二极管 D(VD1, VD2), 子模块中的电容起到提供直流电压和抑制输出谐波的作用^[11]。 U_{sm} 和 I_{sm} 分别为输入电压和输入电流, I_c 为集电极电流。IGBT 模块在 SM 内导通状态下, 典型的近似线性关系如下^[12]。

$$U_T = U_{T0} + i_T \cdot r_T \quad (3)$$

$$U_D = U_{D0} + i_D \cdot r_D \quad (4)$$

式中: U_T 、 U_D 分别为 IGBT 和二极管导通时的端电压; i_T 为 IGBT 集电极电流; i_D 为二极管电流; U_{T0} 、 U_{D0} 为通态电压偏置; r_T 、 r_D 为通态电阻。

通过控制 VT1、VT2 的导通, 使子模块处于不同的工作状态, 取流入子模块方向为正, 过程如下。

1) 闭锁状态: 当 VT1 和 VT2 均处于关断状态, 此时开启 MMC, 如果电流流向为正, 则子模块向电容器充电, 电压表现为电容电压 U_c ; 如果电流方向为反, 则子模块被旁路, 输出电压为 0。

2) 投入状态: 当 VT1 导通, VT2 关断, 若桥臂电流为正, 电容充电; 若桥臂电流为负, 电容处于放电状态, 输出电压均为电容电压 U_c 。

3) 切除状态: 当 VT1 关断, VT2 导通, 子模块处于被旁路状态, 输出电压为 0。

不同状态下子模块电流流向图如图 2 所示。

基于以上分析, 将不同情况下子模块的工作情况总结于表 1, 其中 0 表示关断, 1 表示导通, 正方向为流入子模块的电流方向。

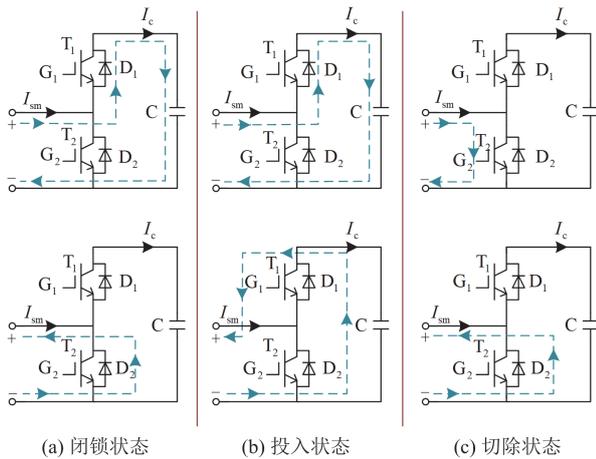


图 2 子模块电流流向图

Fig. 2 Current flow diagram of sub-module

表 1 子模块工作情况

Table 1 Working conditions of sub-modules

工作状态	VT1	VT2	电流方向	工作情况
闭锁	0	0	正	电容充电
闭锁	0	0	反	子模块旁路
投入	1	0	正	电容充电
投入	1	0	反	电容放电
切除	0	1	正	子模块旁路
切除	0	1	反	子模块旁路

2 IGBT 模块失效机理

IGBT 失效是一个长期过程，是由微小的劣化形态在模块内部长期累积的结果，IGBT 模块长期处于通断快速变换和电流电压剧烈波动的工作状态，内部形成一个“电-热-力”多物理场多耦合的复杂劣化环境。热场与应力场之间，温度升高导致各层材料之间热应力增强，同时应力增强造成内部结构损坏，影响器件散热；热场与电场之间，温度升高引起热阻升高，通态电压电流上升，加深功率损耗，同时导通电流增大产生焦耳热，导致内部温度升高，IGBT 模块内“电-热-力”场如图 3 所示^[13]。

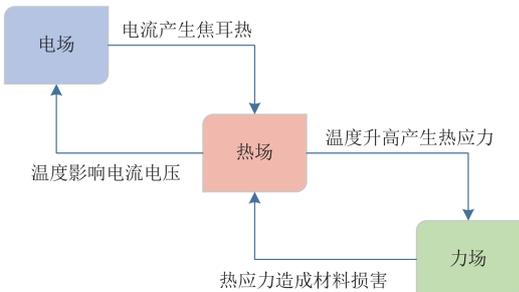


图 3 IGBT 模块内“电-热-力”场

Fig. 3 Electro-thermo-mechanical field in IGBT module

根据封装结构的不同，IGBT 可分为焊接式 IGBT(power-module IGBT, PMI)和压接式 IGBT(pack IGBT, PPI)。当下 PMI 的使用量最大，不过 PPI 由于其失效短路、散热性好、抗冲击能力强等优点，具有较大的发展前景。由于两种 IGBT 的结构不同，劣化机理也存在差异。

2.1 PMI 失效机理

PMI 的封装结构及各材料热膨胀系数(coefficient of thermal expansion, CTE)如图 4 所示。封装内部芯片、陶瓷衬板和基板由焊料层连接，通过键合线实现芯片间的连通，形成电气回路。通常意义上可根据 PMI 结构特点和失效形式的不同分为芯片失效、封装失效层面下的键合线脱落和焊料层疲劳。

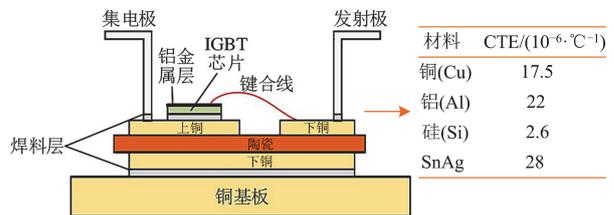


图 4 PMI 的封装结构及各材料热膨胀系数

Fig. 4 PMI package structure and CTE of materials

2.1.1 芯片失效

半导体芯片的失效主要有开路和短路两种形式。其中，开路失效主要源于驱动信号的丢失、振荡下的联接断裂和绑定线脱落等^[14]。开路失效会产生电流脉冲，导致输出电流电压的失真，虽不会瞬间性失效，但长期累积后依然会引起器件瘫痪^[15]。

短路失效主要集中在键合线和芯片的键合处，失效过程是瞬时且不可阻止的^[16]。短路失效的原因主要包括电气过应力、静电放电、闩锁效应等。电气过应力是指器件承受超出其额定范围的过电压、电流和功率等。以过电压为例是芯片失效的主要原因，变流线路中由于杂散电感和负载电感的存在，在 IGBT 由导通过到关闭的状态变换中，感应电动势和直流电压叠加，致使 IGBT 产生过电压，造成芯片热击穿^[17]。不同材料之间的静电荷放电现象和 IGBT 模块关断过程中的闩锁效应都会对芯片造成侵蚀损害，严重时导致芯片短路失效^[18]。

2.1.2 键合线失效

键合线失效形式有键合线翘曲、键合点裂纹和键合线脱落等^[19]。其中键合线脱落是主要形式，据统计在铝质键合线 IGBT 失效总量中，由键合线脱落导致的失效约占 70%^[20]。键合线脱落多发生在键合线与芯片的接合处，在热与冷的循环效应下，因为键合点材料 CTE 差异较大，在热应力的作用下，

键合处的裂纹从接合点两端向中心处延展, 最终键合线脱离^[21]。键合线裂纹延展图如图 5 所示。

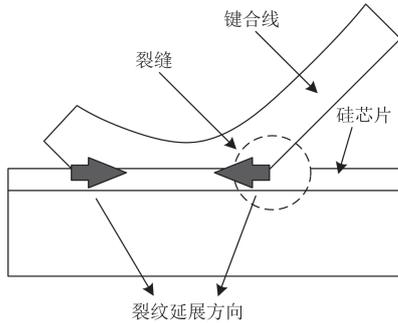


图 5 键合线裂纹延展图

Fig. 5 Bonding wires crack extension diagram

2.1.3 焊料层失效

由 PMI 的封装结构可知, 封装内部存在硅芯片与陶瓷层(direct copper bonding, DBC)和陶瓷层与基板之间两层焊料层。焊料层的老化失效主要体现在焊料层裂缝与焊料层空洞, 在热循环与机械应力的作用下, 由于芯片与基板的热膨胀系数不匹配, 在焊料层中形成由剪切应力产生的裂缝, 伴随着模块热阻与结温的增加, 焊料层劣化程度不断加深, 最终甚至形成空洞, 可将焊料层的失效机理概括如图 6 所示^[22-24]。

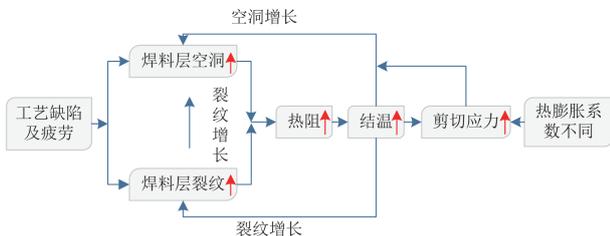


图 6 焊料层失效机理

Fig. 6 Solder layer failure mechanism

研究表明, 结温会随着空洞率的增加而增加, 且位于边角处的空洞危害性最大^[25-26]。文献[27]认为 IGBT 模块的失效形式与最高结温有关, 在最高结温较低时, 键合线是应力集中点; 最高结温较高时, 焊料层是应力集中点。可将 PMI 失效形式与失效机理总结于表 2 中。

2.2 PPI 失效机理

PPI 的封装结构如图 7 所示。PPI 封装内部结构主要由钼层、半导体硅芯片、铜层和银垫片多种材质压接而成, 外部由门极弹簧针实现栅极连接。因为 PPI 不具有键合线和焊接层结构, 所以其失效机理也不同于 PMI。通常将 PPI 的失效形式分为弹簧失效、微动磨损、栅氧化层老化和层间微腐蚀 4 种。

表 2 PMI 失效模式总结

Table 2 PMI failure mode summary

失效层面	失效类型	主要失效形式	主要失效机理
芯片失效	芯片疲劳	开路失效	驱动信号丢失、内部联接断裂、绑定线脱落等
		短路失效	电气过应力、静电放电、闩锁效应等
封装失效	键合线失效	键合线脱落、键合线翘曲、键合点裂纹	CTE 不匹配、热应力等
	焊料层失效	焊料层裂纹、焊料层空洞	制造工艺缺陷、CTE 不匹配、剪切应力等

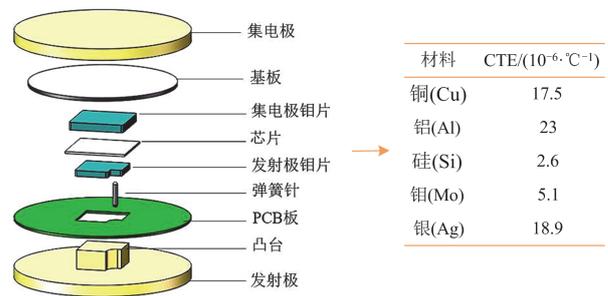


图 7 PPI 封装结构

Fig. 7 PPI package structure

2.2.1 弹簧失效

PPI 需要弹簧的夹紧力维持模块内部部件之间的良好接触, 但由于模块内部热循环的持续影响, 弹簧在应力波动下发生松弛老化。伴随着弹簧松弛带来的接触不良问题, 门极的温度上升, 继而加速门极的失效^[28]。

2.2.2 微动磨损

在功率循环过程中, 模块内部会产生热与冷的交替循环, 由于各层材料的热膨胀系数不同, 会导致各层之间的错位滑动^[29]。在摩擦过程中, 表面粗糙度增加, 紧接着接触热阻增加, 结温升高, 加速了模块的老化。

2.2.3 栅氧化层老化

当栅极和发射极的氧化层被损坏, 驱动电压降低, 形成极间短路现象, 短路电流会导致栅氧化层损坏老化。栅氧化层的老化会造成集电极电流增大, 导致器件失效^[30]。

2.2.4 层间微腐蚀

PPI 在长期功率热循环的环境下, 由于各层材料之间的接触不良, 在热应力与电应力的作用下, 在银片和铜片之间产生电弧放电现象, 最终造成层与层之间的微腐蚀情况^[31]。将以上 PPI 失效形式与老化机理总结如表 3 所示。

表 3 PPI 失效模式总结

Table 3 Summary of PPI failure modes

失效形式	导致因素	失效过程机理
弹簧失效	热应力	门极弹簧在热循环作用下变得松弛
微动磨损	热应力	由于各层材料的 CTE 不匹配 发生层间摩擦
栅氧化层老化	电应力	栅极与发射极氧化层损坏, 驱动电压下降
层间微腐蚀	电应力、 热应力	银片和铜片接触层之间存在 电弧现象

目前对 IGBT 模块封装失效机理的研究取得较大进展, 但是对芯片失效机制的研究不够充分, 且研究主要集中在 PMI, 而对 PPI 的封装失效机理认知有限。压力的均匀分布对 PPI 在 MMC 子模块的运行可靠性极其重要, 对于 PPI 模块在内部“电-热-力”耦合场的作用下导致的压力分布不均现象, 器件全生命周期的失效老化机制和各状态参数演变规律具有巨大研究前景。

3 IGBT 模块状态监测研究

国内外对 IGBT 模块状态监测方法的研究已取得了一定的成果, 但对于结合 MMC 工作特性的 IGBT 模块状态监测技术的研究较少。由以上 IGBT 模块失效机理的分析可知, 在老化过程中, 其物理结构发生微妙的变化, 而这种变化往往体现在外特征参数的改变, 例如热阻、导通压降、结温等参数的改变。基于此, 目前对 IGBT 模块状态监测多采用表征 IGBT 模块健康状况的特征参数监测方法, 常见的 IGBT 模块等效电路图如图 8 所示, 其中集电极电流 I_c 、集电极电压 v_{ce} 等基本电信号是状态监测的重要特征量。根据不同种 IGBT 的老化机理及目前研究热点, 可将 IGBT 模块状态监测方法分为模块封装失效监测和结温监测。

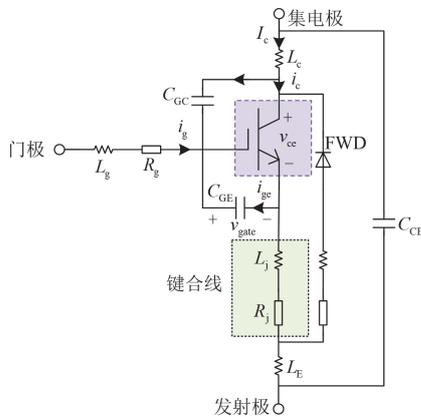


图 8 IGBT 模块等效电路图

Fig. 8 IGBT module equivalent circuit diagram

3.1 封装失效监测

采用导通电阻 R_{on} 、集电极饱和电压 V_{ce} 和热阻 R_{th} 等重要特征参数来评估 IGBT 模块的封装老化程度。例如, 当键合线脱生根数超出总数的 40% 时, R_{on} 增大约 5%, 可据此判断键合线失效^[32]; 通常在热阻增加 20% 时, 焊料层疲劳老化^[33]; 模块劣化过程中导通压降 V_{ce} 上升幅度不超过 10%, 一般以 V_{ce} 增加 5% 作为模块失效标准^[34-35]。但是上述指标在模块寿命早期和中期几乎没有变化, 却在寿命末期发生突变, 不能精确反映全生命周期的封装劣化情况。且在多芯片大功率 IGBT 内, 多芯片并联结构的电流和热再分布问题将导致上述指标在生命周期早期的灵敏度进一步下降。也有不少学者针对该问题提出一些新颖且高效的封装失效评估方法。

注入信号响应法是指对器件外部注入信号, 经过响应分析评估封装老化状况, 具有较高的灵敏度。文献[36]在栅极和发射极之间注入 0~2.2 MHz 的扫描信号, 测量集电极-发射极响应信号, 可以准确识别键合线故障特征。文献[37]在集电极和发射极之间注入短高压脉冲, 测量栅极和发射极之间的响应电压, 通过分析响应电压幅度和边沿振荡波形数据, 可在 1 μ s 内快速评估键合线状态, 且精度较高。文献[38-39]提出了一种基于扩频时域反射计(SSTDR)的键合线状态评估方法, 通过注入电信号的反射信号特性用于键合线老化评估, 并通过实验分析了失效键合线数量与反射信号幅度之间的关系, 如图 9 所示。

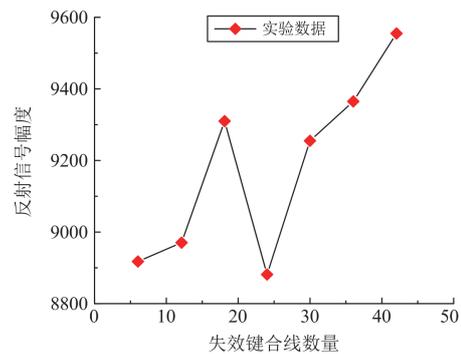


图 9 失效键合线数量与反射信号幅度关系

Fig. 9 Number of failed bonding lines vs. the amplitude of the reflected signal

声学信号法最先由文献[40]提出, 通过监测 IGBT 开关瞬态过程中产生的声信号来获得状态信息。文献[41]中发现焊料层的热膨胀是产生声信号的原因, 并通过对不同老化程度的 IGBT 的声学信号进行频域分析, 发现声学信号频谱存在较大差异,

声信号在生命周期开始时的频谱幅度要明显高于生命周期结束时的分频频谱幅度。文献[42]研究认为焊料层的老化可能会导致声阻抗的增加和部分频率声信号幅度的变化。

综上所述, 注入信号响应可以作为一种研究思路, 来解决目前广泛使用的监测指标无法准确评估多芯片模块中电流和热再分布导致的封装劣化问题, 实现全寿命周期的运行状态监测。然而, 大多数注入信号响应法需要在器件离线状态下注入电信号, 仅适用于离线测量, 如何将其应用于在线监测需要进一步研究。声学信号法具有侵入性小、在线监测能力强、成本较低等特点, 具有一定的过程应用前景, 不过如何在复杂的磁场和噪音的测量环境下解耦分离出精确的特征参数, 以保证监测精度, 依然面临着巨大挑战。

3.2 结温监测

结温是 IGBT 模块状态监测和可靠性评估的重要特征量, 研究表明, 60%的 IGBT 失效都是由热应力引起, 结温每上升 10 °C, 失效率将会翻倍^[43]。且在对导通压降和热阻等参数的监测过程中, 需要排除结温影响以保证结果的精确性。因此实时精确地获取结温信息对 IGBT 模块的状态监测有着极其重要的意义。目前 IGBT 模块的结温监测主要集中在电热耦合模型法与温敏参数法两方面。

3.2.1 电热耦合模型法

电热耦合模型法根据 IGBT 模块的运行特性, 将电压电流等电参数输入到对应的 IGBT 和 FWD 损耗模型, 再把计算得到的功率损耗输入到热网络模型推算出实时结温, 具体过程如图 10 所示。

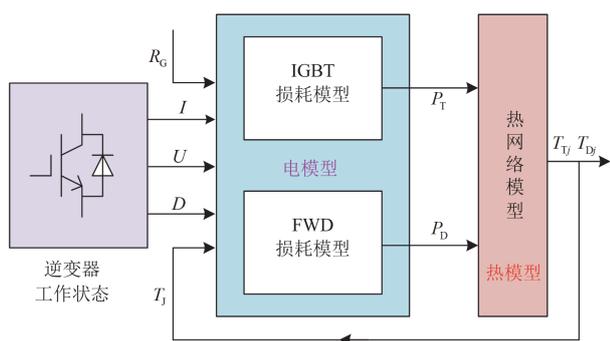


图 10 电热耦合模型结温预测法原理图

Fig. 10 Schematic diagram of junction temperature prediction method of electrothermal coupling model

热网络模型需要根据器件出厂数据或测量得到的瞬态热阻抗曲线建立, 主要分为 Cauer 模型和 Foster 模型两种, 具体模型如图 11 所示。Cauer 模

型可以得到较为真实的结构热阻与热容, 可以精确地获得 IGBT 各层的温度, 但模型的建立比较困难; Foster 模型不能反映各层真实结温信息, 误差较大, 但是模型的建立比较简单^[44-45]。

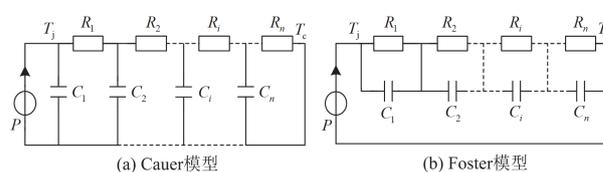


图 11 Cauer 模型与 Foster 模型

Fig. 11 Cauer model and Foster model

电热耦合模型法融合了器件结构特性和运行参数, 计算速度快, 适合长时间尺度下的结温监测, 但是随着老化的加深, 原始电热参数发生改变, 这将严重影响测量精度。目前模型结温预测法主要集中在功率损耗的精确测量、提高计算速度和监测精度等方面。研究表明, 当损伤增加 20%时, 对应的 Foster 模型热阻增加约 10%, 考虑老化进程的结温计算方法可极大提高热阻模型法的精确性^[46]。文献[47]根据多芯片压接式 IGBT 芯片间耦合关系, 研究了 PPI 模块内部多物理场耦合机理, 建立了基于一维 Cauer 热网络模型的 PPI 模块内部“电-热-力”多物理场直接双向耦合模型, 提高了精确性和真实性。文献[48]提出了一种结合温度相关 IGBT 模型与功率损耗模型的 IGBT 损耗估计方法, 建立了 IGBT 和二极管电瞬态模型, 并根据 IGBT 和二极管的反向恢复特性来模拟瞬态开关波形。基于损耗模型和实际监测的结温、电压和电流等参数, 建立损耗模型, 实现 IGBT 功率损耗估算。文献[49]提出了一种利用结温冷却曲线来估计 IGBT 模块热网络参数的方法。它有两个优点: 无需知道 IGBT 的功率损耗; 无需将 IGBT 加热至热稳态。该方法通过建立 RC 参数与结温响应曲线时间常数之间的关系, 可以直接得到四阶 Cauer 模型的热阻容参数。

3.2.2 温敏参数法

温敏参数法对器件封装破坏性小, 响应速度快, 是目前最具研究潜力的 IGBT 模块结温监测方法之一。温敏参数法需要先在离线状态下获取温敏参数与结温的对应关系, 然后在实际工作中测量参量, 通过对应关系得到结温信息。通常可将温敏参数分为静态与动态两种, 静态参数是功率器件在关断或者导通下的参数, 与之相对的动态参数是指器件处于状态转换过程中的参数。具体分类如图 12 所示。

目前对温敏参数法的研究主要集中在提高实时

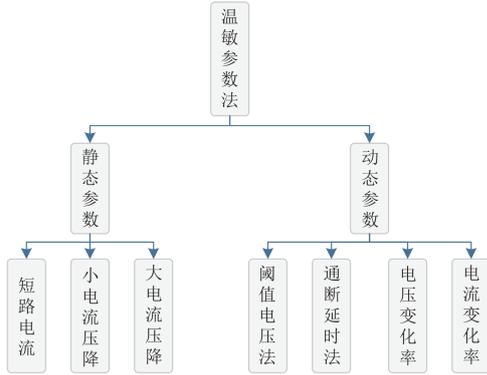


图 12 温敏参数分类

Fig. 12 Classification of temperature-sensitive parameters

性和准确性等方面。文献[50]根据 IGBT 运行特性设置一个只与结温有关，与键合线老化无关的基于组合短路电流的组合温敏参数 V_0 ，其表达式为

$$V_0(T_j) = \frac{9.3I_{SC2} - 11I_{SC1} + 5.8(I_{SC1} - I_{SC2})}{I_{SC2}\sqrt{I_{SC1}} - I_{SC1}\sqrt{I_{SC2}}} \quad (5)$$

通过温度标定实验验证了不同老化程度下 V_0 与结温具有负相关性和良好的线性度，实验证明该结温监测法的最大误差约为 4.26%，监测效果良好。文献[51]提出了一种能够在线测量 V_{ce} 的监测电路，如图 13 所示。该电路使用两个串联的二极管来检测具有毫伏精度的 V_{ce} 电压。一个二极管起到保护作用，阻止输入端子上出现高直流电压。当器件导通时，测量第 2 个二极管上的电压以补偿保护二极管上的电压降，从而消除由二极管正向电压温度依赖性而引起的电压偏移。此外该电路可以很容易地集成到当前和新的转换器设计中，可集成性较高。

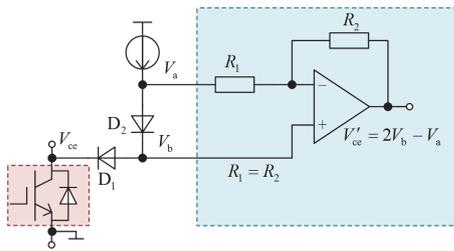


图 13 V_{ce} 在线测量电路原理图

Fig. 13 Schematic diagram of V_{ce} online measurement circuit

文献[52]研究表明导通延迟期间栅极-发射极电压的导通波形呈现出一个拐点，之后栅极电压显著增加，此时电压与温度的关系由正相关变为负相关。并结合导通延迟时间 t_{don} 和与温度负相关的栅极预阈值电压 V_{ge} (VFB)，提出了一种基于门极预阈值电压的结温在线估计模型，可以避免母线电压对监测精度的影响。文献[53]提出了一种基于关断

延迟时间 t_{doff} 的 IGBT 结温估计方法，利用 IGBT 模块的固有寄生电感 L_{ce} 来提取关断延迟时间 t_{doff} ，通过监测 L_{ce} 上的感应电压确定关断延迟时间的起点和终点。文献[54]提出了一种基于最大集电极电流下降率的 IGBT 结温提取方法，研究了最大集电极电流下降率与结温的线性关系。根据寄生电感 L_{ce} 就可以测量出最大 dI_c/dt ，该方法具有良好的应用前景。文献[55]利用电感电压 V_{ce} 获得电流变化率和结温信息，通过分析得到结温与电感电压的关系为

$$T_j \approx \frac{I_L V_{ceE_{max}}(T_0)}{I_0 V_{ceE_{max}}(T_j)} (T_0 + 158.74) - 158.74 \quad (6)$$

只要选取式中合适的基准值点 $(I_0, T_0, V_{ceE_{max}}(T_0))$ 即可进行结温监测，监测电路如图 14 所示。通过结合双脉冲电路和小电流压降电路，可同时获得温敏参数 $V_{ceE_{max}}$ 和对应的 IGBT 模块瞬态结温，该结温预测模型具有破坏性小且集成性高等优点。

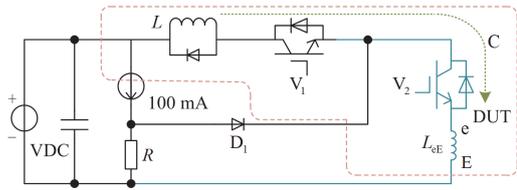


图 14 改进电流变化率监测电路原理图

Fig. 14 Schematic diagram of improved current change rate monitoring circuit

一般地，可将各温敏参数与结温的正负相关性、温度灵敏度、实现复杂度的关系总结于表 4 所示。

由表 4 可知，温敏参数法虽具有较好的性能，但是实际监测流程中如何在测量电路中轻易实现，以及保证精确度和控制监测成本依然是一个难题。在实际工况下，尤其对于大规模高压柔性直流输电系统，以上基于模型的监测方法较难实现 IGBT 模块高精度的实时监测。目前已有学者利用高效率的智能算法对复杂系统下 IGBT 模块进行在线监测研究。文献[56]分析了基于 IGBT 模块的全桥整流器运行状态，并使用静态神经网络进行状态监测，根据实际测量值与理论值的偏差来诊断设备的运行状态。文献[57]提出了一种使用遗传算法优化反向传播神经网络的外壳温度识别方法来监测 IGBT 的状态，过程如图 15 所示。该方法以电气参数为输入，外壳温度为输出，将模块的预测外壳温度值与正常值进行比较，实现器件的状态评估。文献[58]使用鲸鱼优化算法优化的极限学习机来评估 IGBT 模块的老化状态。首先，利用不同老化阶段的热特性数据将 IGBT 的老化状态分为 5 个阶段，并利用上

表 4 各温敏参数性能总结表

Table 4 Performance summary table for each temperature-sensitive electrical parameter

温敏参数	正负相关性	温度灵敏度	实现复杂度
短路电流	负	0.345 A/°C	在短路过程中很可能会出现热失控, 这会降低电源模块的可靠性, 实现困难
小电流压降	负	-2.3 mV/°C	测量电路相对简单, 易于实现
大电流压降	正/负	1 mV/°C	
阈值电压	负	-10~-2 V/°C	在测量过程中, 栅极电阻容易引起同步抖动, 从而导致显著的温度测量误差, 测量电路复杂
开通延迟时间	负	2 ns/°C	需要由脉冲信号采样器、脉冲输入信号整形电路、时间间隔测量电路组成的复杂电路来准确提取开关过程中的时间, 实现难度较大
关断延迟时间	正	4 ns/°C	
电压变化率	负	7 V/(μs·°C)	需要将电压或电流的变化率转换成合适的可观测量信号, 这对测量电路有很高的要求
电流变化率	负	40 A/(μs·°C)	

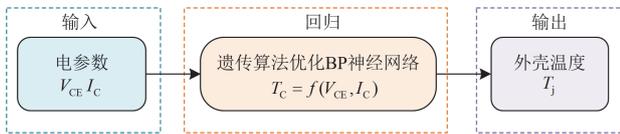


图 15 BP 神经网络状态监测示意图

Fig. 15 Schematic diagram of BP neural network status monitoring

述数据处理鲸鱼优化算法优化的极限学习机训练, 然后实现老化模型的建立, 将待测 IGBT 的电特性和热特性输入到老化模型中, 确定 IGBT 的老化状态。

然而, 利用智能算法获取 IGBT 特性参数值的方法, 通常需要使用一定数量的样本对网络模型进行离线训练, 然后将未来某个时间检测到的信号与训练好的模型结合, 得到 IGBT 的当前状态。由于 IGBT 在性能退化过程中, 其特性参数的退化趋势和演变规律可能会随着时间而改变。因此, 为了准确估计整个生命周期范围内的 IGBT 状态, 需要不断引入足够的新样本数据来重新训练网络, 更新网络模型参数。且该类方法在监测过程中极易受外界噪声干扰, 需要大量数据提高监测精度。所以利用智能算法的状态监测面临以下两大挑战: 1) 如何降低或排除噪声带来的测量误差; 2) 如何获取大量数据并不断注入新数据建立数据库。

4 MMC 的 IGBT 模块状态监测研究

基于 MMC 的直流输电系统结构复杂, IGBT 模块不仅有自身内部的老化机理, 同时 MMC 桥臂功率、调制策略以及强烈的电磁噪声工作环境也增加了监测难度。目前对于模块化多电平换流器 IGBT 模块状态监测技术的研究较少。基于上面 IGBT 模块的普适监测方法, 有学者在绝缘性能监测、运行参数的在线提取、功率损耗和结温监测等方面做了一些研究。

IGBT 模块在老化失效过程中会产生由机械应力导致的内部结构改变, 同时伴随着模块局部放电, 不同类型的结构缺陷对应着不同形式的局部放电。目前对 PMI 的局部放电研究较多, 对 PPI 研究较少。文献[59]对 PMI 进行了局部放电实验, 通过放电值和 PRPD 谱估计了 IGBT 的老化程度。文献[60]研究了不同电压等级下的放电值和 PRPD 谱的差异, 提取了气隙放电、表面放电和电晕放电 3 种放电形式。文献[61]对额定电压为 3.3 kV 的 PPI 模块进行了局部放电实验, 在直流和交直流高压叠加的作用下发现了局部放电现象, 认为局部放电是导致绝缘失效的关键因素, 且发生在绝缘失效击穿之前。在 MMC 拓扑中, IGBT 与子模块电容并联连接, 类似于脉冲电流法的测试电路, 该拓扑结构为 MMC 局部放电在线监测奠定了硬件基础^[62]。文献[63]搭建了最近电平调制下的单相七电平电路仿真模型, 采用三电容模型模拟了 IGBT 并联局部放电的过程, 电路模型如图 16 所示。子模块中 IGBT 局部放电的仿真过程如下: 当绝缘缺陷部分电容上的电压超过阈值时, 闭合开关, 将半导体电阻连接到电路中。当电容器电压降低, 不能维持局部放电时, 断开开关, 局部放电停止。并将 MMC 子模块的开关信号与小波

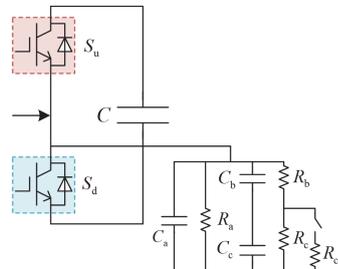


图 16 子模块 IGBT 局部放电电路模型

Fig. 16 Model of the partial discharge circuit of the submodule IGBT

分解相结合, 分析了 MMC 子模块中电容电流。根据 MMC 子模块的开关状态来辨别 IGBT 是否发生局部放电。结果表明该方法能识别小幅度局部放电电流, 灵敏度较高。然而在该方法中, 由于局部放电信号的特点, 数字采集装置和传感器要求高采样率和带宽, 对实际应用带来了挑战。

通过对模块化多电平换流器运行特性和设备失效机理的研究表明, IGBT 模块热阻、容值、电流电压是状态监测的重要参量^[64-66]。文献[67]针对通过传感器采集的子模块桥臂数据存在测量噪声的问题, 引入卡尔曼滤波理论, 在线性最小方差准则下, 建立了 MMC 子模块 IGBT 状态参数监测信息的数学模型, 从而得到桥臂各子模块 IGBT 状态参数。MMC 桥臂子模块 IGBT 模块状态参数监测系统如图 17 所示。实验结果表明该算法可将测量误差控制在 1.7%之内, 计算精度可以满足工程上对子模块 IGBT 状态监测的要求。此外, 该方法仅利用输电系统中已布置的传感器, 减少了额外传感器的使用, 降低了监测成本。但该方法在卡尔曼滤波算法中需要假设系统是线性的, 且系统噪声为高斯白噪声, 不过在实际工况中系统往往是非线性的, 且噪声为非高斯噪声, 所以该方法的实际应用能力有待进一步验证。

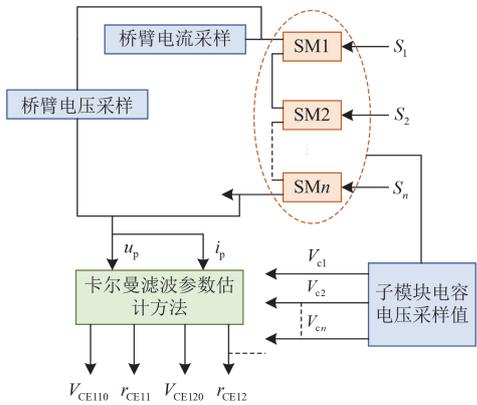


图 17 MMC 桥臂子模块 IGBT 模块状态参数监测系统
Fig. 17 MMC bridge arm sub-module IGBT module status parameter monitoring system

MMC 子模块中 IGBT 模块运行工况下损耗的精确计算是目前的研究热点, 也是结温监测的关键一环。文献[68]根据 MMC 中 SM 的工作原理, 使用多项式曲线拟合模型计算 MMC 子模块中 IGBT 的平均功率损耗, 计算量小且精度较高, 但是该方法只能获取 SM 中单个 IGBT 的功耗信息。文献[69]提出了基于系统运行参数和调制控制策略的适用不同类型 SM 的 MMC 换流阀损耗通用算法, 能精确

获得不同运行工况下子模块各开关器件的平均损耗。文献[70]根据 MMC 的稳态工况和脉冲调制模式, 在数字计算程序中复现出一个工频周期内各开关器件脉冲波形和换流器稳态电压电流波形, 得到 MMC 各开关器件的电压波形和电流波形, 结合器件的关键参数得到各开关器件的损耗, 并针对某 200 MVA 的柔性直流输电工程, 对 MMC 的损耗特性进行了分析。文献[71]针对桥臂电流的直流偏置特性, 考虑不同调制策略下的器件电流重现, 建立基于开关周期的 IGBT 模块平均功率损耗计算模型。其中通态损耗 P_{cond} 如式(7)所示, 开通损耗 P_{on} 和关断 P_{off} 损耗分别如式(8)和式(9)所示。

$$P_{\text{cond}} = U_{\text{ce}}(t)I_{\text{T}}(t)\delta(t) \quad (7)$$

$$P_{\text{on}} = f_{\text{sw}} E_{\text{sw_on}} \frac{I_{\text{T}}}{I_{\text{N}}} \cdot \frac{U_{\text{dc}}}{U_{\text{N}}} K_{\text{Rg_on}} K_{\text{Tj_I}} \quad (8)$$

$$P_{\text{off}} = f_{\text{sw}} E_{\text{sw_off}} \frac{I_{\text{T}}}{I_{\text{N}}} \cdot \frac{U_{\text{dc}}}{U_{\text{N}}} K_{\text{Rg_off}} K_{\text{Tj_I}} \quad (9)$$

式中: $\delta(t)$ 为 IGBT 的开关周期占空比; f_{sw} 为开关频率; $E_{\text{sw_on}}$ 、 $E_{\text{sw_off}}$ 分别为 IGBT 额定条件下的开通能耗、关断能耗; $I_{\text{T}}/I_{\text{N}}$ 、 $U_{\text{dc}}/U_{\text{N}}$ 分别为 IGBT 的电流、电压折算系数; $K_{\text{Rg_on}}$ 、 $K_{\text{Rg_off}}$ 为驱动电阻 R_{g} 对开通能耗、关断能耗的影响系数; $K_{\text{Tj_I}}$ 为结温对开关损耗影响的温度系数。将一个工频周期均分成 K 个点, 累加计算求均值, 即基于工频周期的平均功率损耗, 二极管采用同样的平均损耗算法。

目前对 MMC 中 IGBT 模块的结温监测研究多采用电热耦合模型的方法。由于 MMC 的直流偏置特性, 整流和逆变工况下子模块内部存在上、下管热和损耗不平衡现象。针对该情况, 文献[72]根据 MMC 系统运行参数特性, 提出了简化的正弦半波损耗计算模型估算 MMC 中功率器件基频结温波动, 但该模型未提供考虑长时间任务剖面下的结温波动计算方法。文献[73]基于输出基频周期的平均损耗模型, 提出了长时间任务剖面下 MMC 换流器中功率器件基频结温波动快速计算方法, 如图 18 所示, 图中 MMC 系统运行工况参数主要是指电压调制系数、直流母线电压、传输功率、输出频率和功率因数等电气参数。

最后通过三相 MMC 逆变系统验证了该方法能较为精确地预测 SM 中 IGBT 模块的结温和长时间下的结温波动信息, 为 IGBT 模块疲劳失效的状态监测和寿命评估提供了思路。文献[74]分析了半桥型 SM 的电流分布特性, 并通过数学模型计算了 IGBT 模块的电流波形, 如式(10)和式(11)所示。

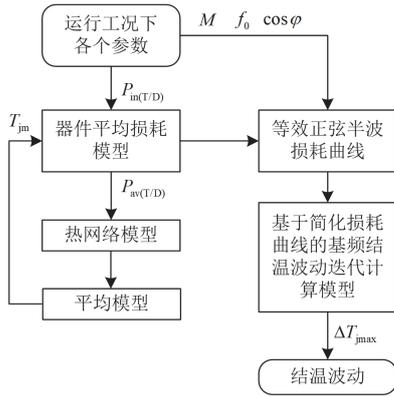


图 18 结温波动估计流程图

Fig. 18 Flowchart of junction temperature fluctuation estimation

$$i_{VT1} = \cos[\text{sgn}(S(t))]\sin[\text{sgn}(i_m(t))]i_m(t) \quad (10)$$

$$i_{VT2} = \cos[\text{sgn}(1 - |S(t)|)]\cos[\text{sgn}(i_m(t))]i_m(t) \quad (11)$$

式中: i_{VT1} 为 V_{T1} 的电流; i_{VT2} 为 V_{T2} 的电流; $i_m(t)$ 为桥臂电流; $S(t)$ 表示开关状态, 取值 0 或 1。并通过 ANSYS/Twin Builder 计算 MMC 半桥型 PPI 子模块的功率损耗。将功率损耗代入 3D 热网络得到 PPI 中每个芯片的结温。用 1500 MW 的 MMC 系统计算 PPI 的瞬态结温, 并分析整流和逆变状态下半桥型 PPI 子模块的结温变化特性。可以发现在逆变条件下, V_{T2} 的功率损耗大于 V_{T1} , 相应地 V_{T2} 温度也大于 V_{T1} ; 在整流状态下, V_{T2} 的功率损耗小于 V_{T1} , 温度也小于 V_{T1} 。文献[75]利用线性拟合计算了半桥型 SM 的功率损耗, 根据半桥型子模块 IGBT 的散热器布局特点, 建立了器件的热阻模型, 如图 19 和图 20 所示。

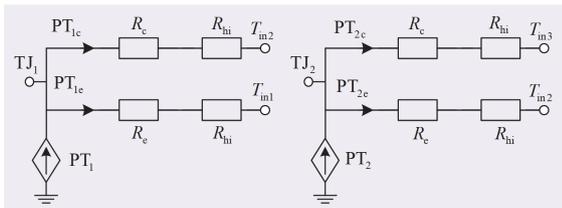


图 19 IGBT 的热阻模型

Fig. 19 Thermal resistance model of IGBT

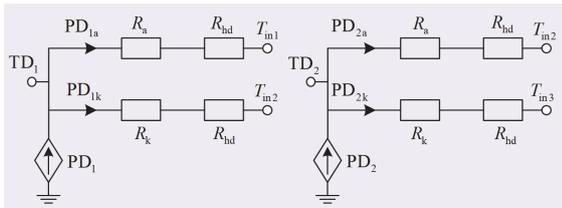


图 20 二极管的热阻模型

Fig. 20 Thermal resistance model of diodes

图 19 和图 20 中, PT_1 、 PT_2 、 PD_1 、 PD_2 为 IGBT 与二极管的总损耗; PT_{1c} 、 PT_{1e} 、 PT_{2c} 、 PT_{2e} 、 PD_{1a} 、 PD_{1k} 、 PD_{2a} 、 PD_{2k} 为器件不同的极所分担的损耗; R_c 、 R_k 、 R_a 、 R_k 为器件不同极的热阻; R_{hi} 、 R_{hd} 为散热器外壳到 IGBT、二极管的热阻; T_{m1} 、 T_{m2} 、 T_{m3} 为散热器外壳的温度。根据上述热阻模型, 结合器件的数据手册给出了 IGBT 模块的结温计算模型。实验结果与理论仿真结果基本接近, 验证了该算法的可行性。

基于以上研究可以得出以下结论:

1) 局部放电状态监测方法具有一定的可行性, 不过由于局部放电信号往往较为微弱, 且易受外界电磁噪声等因素的影响, 这对传感器的性能提出较高的要求, 如何利用智能算法优化监测过程可能是一个突破点。

2) 目前针对 MMC 子模块功率器件平均功率损耗的计算主要采用线性拟合的计算方法, 但没有提供优化措施, 与真实数据难免存在一定的差异。

3) 当下对 MMC 内 IGBT 模块的结温监测研究以热阻模型法为主, 但没有考虑老化进程对模型准确性的影响, 且缺乏将温敏参数等方法应用在 MMC 开关器件结温监测领域的研究。

5 总结与展望

本文论述了 MMC 及其子模块的结构特性和运行原理、IGBT 模块的失效机理以及目前模块化多电平换流器 IGBT 模块的状态监测方法。根据研究现状以及发展趋势, 推测未来柔性直流输电系统 IGBT 模块的状态监测方法可能有以下几个研究方向:

1) 失效机理和状态参数演化规律的研究。MMC 子模块内部各器件劣化过程存在失效耦合关系, 充分研究器件之间失效相关性对 IGBT 模块特征参数的精确测量有重要意义。目前对多芯片并联 PPI 模块的局部放电、导通压降、热阻和导通电阻等参数在全生命周期下的演化规律认知不够充分, 因此需要对其进行深入研究, 从而为 MMC 高压 PPI 模块的状态监测提供理论支撑。

2) 状态监测参数在线提取的研究。在高压直流输电复杂的工作环境下, 桥臂电信号及子模块参数的提取过程面临高强度的电磁、噪声干扰, 尤其是新兴的声学信号和电磁场信号状态监测方法的测量误差进一步加大。因此通过高效的智能算法降低参数提取过程中环境因素导致的误差会是将来的研究重心。

3) 考虑 MMC 运行特性的状态监测方法研究。MMC 内子模块众多, 采用附加传感器的 IGBT 模块监测方法存在高成本的问题。对于高压柔性直流输电系统, 阀门控制以几千赫兹的频率监测子模块的直流电压和桥臂电流, 可为 IGBT 模块的状态评估提供大量实时数据, 可用于计算 IGBT 模块的功率损耗或导通电阻。同时也可以对冷却系统甚至 IGBT 模块封装进行直接温度检测, 这也是获取 IGBT 模块内部温度和功率损耗的有效方法, 不过该方法需克服电信号测量误差对监测结果的影响。

参考文献

[1] 班国邦, 牛唯, 杨旗, 等. 模块化多电平直流融冰装置谐振机理及抑制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 180-187.
BAN Guobang, NIU Wei, YANG Qi, et al. The resonance mechanism and suppression measures of DC ice-melting equipment based on a modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 180-187.

[2] SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection of hybrid MMC DC grid based on active detection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 82-96.

[3] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 20-32.
ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 20-32.

[4] 崔江, 王友仁. 采用基于模糊推理的分类器融合方法诊断电力电子电路参数故障[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(8): 54-59.
CUI Jiang, WANG Youren. Testing the parametric faults of power electronic circuits applying classifiers fusion method based on fuzzy inference[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(8): 54-59.

[5] YANG S, BRYANT A T, MAWBY P A, et al. An industry-based survey of reliability in power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1441-1451.

[6] CHOI U M, BLAABJERG F, IANNUZZO F, et al. Junction temperature estimation method for a 600 V, 30A IGBT module during converter operation[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(9-10): 2022-2026.

[7] 王兴贵, 张文莲, 薛晟. 基于 EEMD 的 MMC 串联结构微电网微源动态冗余控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 34-42.
WANG Xinggui, ZHANG Wenlian, XUE Sheng. A micro-source dynamic redundancy control strategy based on EEMD for MMC series microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 34-42.

[8] 蒲清昕, 秦亮, 王庆, 等. 模块化多电平变流器子模块电

容老化状态在线监测及均衡策略[J/OL]. 电测与仪表: 1-9[2022-03-23]. DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2022.07.026.

PU Qingxin, QIN Liang, WANG Qing, et al. On-line monitoring and equalization strategy of capacitor aging state of modular multilevel converter sub-modules[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-9[2022-03-23]. DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2022.07.026.

[9] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于半桥型 MMC 的柔性直流电网故障限流方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 175-186.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Review of the fault current limiting approaches for a flexible DC grid based on a half-bridge MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 175-186.

[10] 刘正富, 王朋, 郭敬梅, 等. 基于 MMC 的风电机组低电压穿越测试装置控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 38-47.
LIU Zhengfu, WANG Peng, GUO Jingmei, et al. Control strategy of wind turbine LVRT test equipment based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 38-47.

[11] 张彼德, 洪锡文, 刘俊, 等. 基于无监督学习的 MMC 子模块开路故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 98-105.
ZHANG Bide, HONG Xiwen, LIU Jun, et al. Diagnosis method for sub-module open-circuit fault in modular multilevel converter based on unsupervised learning[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 98-105.

[12] 聂晓华. 一种基于卡尔曼滤波的电能质量扰动检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6649-6658.
NIE Xiaohua. A new method of power quality disturbance detection based on Kalman filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6649-6658.

[13] 唐圣学, 张继欣, 姚丹, 等. IGBT 模块寿命预测方法研究综述[J/OL]. 电源学报: 1-8[2022-03-10]. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2014.3.14.
TANG Shengxue, ZHANG Jixin, YAO Dan, et al. An overview of lifetime prediction methods for IGBT power module[J/OL]. Journal of Power Supply: 1-8[2022-03-10]. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2014.3.14.

[14] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77.

[15] BENMANSOUR A, AZZOPARDI S, MARTIN J C, et al. Failure mechanisms of trench IGBT under various short-circuit conditions[C] // 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2007, Orlando, FL, USA.

[16] WANG Zhiqiang, SHI Xiaojie, TOLBERT L M, et al. Temperature-dependent short-circuit capability of silicon carbide power MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1555-1566.

[17] 郝林钊, 何山, 王维庆, 等. 一种基于 CR-CD 型电路

- 的直驱风机变流器 IGBT 过电压保护电路研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 150-157.
- HAO Linzhao, HE Shan, WANG Weiqing, et al. Research on IGBT overvoltage protection circuit of direct drive wind turbine converter based on CR-CD circuit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 150-157.
- [18] 王希平, 丁祥宽, 姚芳, 等. IGBT 模块失效机理及状态监测研究综述[J]. 中国电力, 2019, 52(9): 61-72.
- WANG Xiping, DING Xiangkuan, YAO Fang, et al. Review of failure mechanism and state monitoring technology for IGBT modules[J]. Electric Power, 2019, 52(9): 61-72.
- [19] CIAPPA M. Selected failure mechanisms of modern power modules[J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(4-5): 653-667.
- [20] WU W, GAO G, DONG L, et al. Thermal reliability of power insulated gate bipolar transistor (IGBT) modules[C]// Twelfth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Proceedings, March 5-7, 1996, Austin, TX, USA: 136-141.
- [21] CHOI U M, BLAABJERG F, JØRGENSEN S, et al. Power cycling test and failure analysis of molded intelligent power IGBT module under different temperature swing durations[J]. Microelectronics Reliability, 2016, 64: 403-408.
- [22] LU H, BAILEY C, YIN C. Design for reliability of power electronics modules[J]. Microelectronics Reliability, 2009, 49(9-11): 1250-1255.
- [23] HUANG H, MAWBY P A. A lifetime estimation technique for voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(8): 4113-4119.
- [24] BOUARROUDJ M, KHATIR Z, OUSTEN J P, et al. Comparison of stress distributions and failure modes during thermal cycling and power cycling on high power IGBT modules[C] // 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, September 2-5, 2007, Aalborg, Denmark: 1-10.
- [25] 孙海峰, 杨舒曼. 焊料层空洞对绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 模块温度分布的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(32): 189-194.
- SUN Haifeng, YANG Shuman. Influence of solder void on temperature distribution of insulated gate bipolar transistor (IGBT) module[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(32): 189-194.
- [26] 肖飞, 罗毅飞, 刘宾礼, 等. 焊料层空洞对 IGBT 器件热稳定性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1499-1506.
- XIAO Fei, LUO Yifei, LIU Binli, et al. Influence of voids in solder layer on the temperature stability of IGBTs[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1499-1506.
- [27] 赵雨山, 邓二平, 马丛淦, 等. 考虑器件结构布局的功率循环失效模式分离机制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2663-2672.
- ZHAO Yushan, DENG Erping, MA Conggan, et al. Separation mechanism of the power cycling induced failure mode with the consideration of geometry layout[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2663-2672.
- [28] 张健, 陈锐, 陈世瑛, 等. MMC 子模块设备老化机理与状态监测研究综述[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 1-8.
- ZHANG Jian, CHEN Rui, CHEN Shiyang, et al. Review on aging mechanism and condition monitoring of devices in MMC sub-module[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 1-8.
- [29] COVA P, NICOLETTO G, PIRONDI A, et al. Power cycling on press-pack IGBTs: measurements and thermomechanical simulation[J]. Microelectronics Reliability, 1999, 39(6-7): 1165-1170.
- [30] TINSCHERT L, ÅRDAL A R, POLLER T, et al. Possible failure modes in press-pack IGBTs[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(6): 903-911.
- [31] POLLER T, BASLER T, HERNES M, et al. Mechanical analysis of press-pack IGBTs[J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(9-10): 2397-2402.
- [32] 孔梅娟, 李志刚. IGBT 模块通态电阻与键合线故障关系研究[J]. 电力电子技术, 2017, 51(11): 91-93.
- KONG Meijuan, LI Zhigang. Study of the relationship between the on-resistance and the bonding-wire lift of the IGBT module[J]. Power Electronics Technology, 2017, 51(11): 91-93.
- [33] 陈民铀, 陈一高, 高兵, 等. 计及焊料层疲劳累积效应的 IGBT 模块寿命评估[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 6053-6061.
- CHEN Minyou, CHEN Yigao, GAO Bing, et al. Lifetime evaluation of IGBT module considering fatigue accumulation of solder layers[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 6053-6061.
- [34] 张健, 余超耘, 刘琛硕, 等. 柔直用压接型高压 IGBT 导通压降演化规律研究[J]. 高压电器, 2021, 57(8): 78-85.
- ZHANG Jian, YU Chaoyun, LIU Chenshuo, et al. Study on evolution law of conduction voltage drop of clamping type high voltage IGBT for flexible direct application[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(8): 78-85.
- [35] CHOI U M, BLAABJERG F, JØRGENSEN S, et al. Reliability improvement of power converters by means of condition monitoring of IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(10): 7990-7997.
- [36] 周生奇, 周维维, 孙鹏菊, 等. 基于频率响应的 IGBT 模块内部缺陷诊断[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2670-2677.
- ZHOU Shengqi, ZHOU Luwei, SUN Pengju, et al. Internal defects diagnosis of IGBT module based on frequency response[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2670-2677.
- [37] 姚陈果, 李孟杰, 余亮, 等. 基于脉冲耦合响应的 IGBT 故障检测方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(15): 3235-3244.
- YAO Chenguo, LI Mengjie, YU Liang, et al. A condition detecting method for the IGBT module based on pulse

- coupling response[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(15): 3235-3244.
- [38] HANIF A, DAS S, KHAN F. Active power cycling and condition monitoring of IGBT power modules using reflectometry[C] // 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 4-8, 2018, San Antonio, TX, USA: 2827-2833.
- [39] HANIF A, DEVOTO D, KHAN F. Bond wire damage detection and SOH estimation of a dual-pack IGBT power module using active power cycling and reflectometry[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(7): 6761-6772.
- [40] KÄRKKÄINEN T J, TALVITIE J P, KUISMA M, et al. Acoustic emission in power semiconductor modules—first observations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(11): 6081-6086.
- [41] MÜLLER S, DRECHSLER C, HEINKEL U, et al. Acoustic emission for state-of-health determination in power modules[C] // 2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), March 21-24, 2016, Leipzig, Germany: 468-471.
- [42] 李辉, 刘人宽, 王晓, 等. 压接型 IGBT 器件封装退化监测方法综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2505-2521.
LI Hui, LIU Renkuan, WANG Xiao, et al. Review on package degradation monitoring methods of press-pack IGBT modules[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2505-2521.
- [43] FABIS P M, SHUM D, WINDISCHMANN H. Thermal modeling of diamond-based power electronics packaging[C] // Fifteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, March 9-11, 1999: San Diego, CA, USA: 98-104.
- [44] LAKHSASI A, HAMRI Y. Transient thermal analysis of fast switching devices by partially coupled FEM method[C] // 2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 7-10, 2006, Ottawa, ON, Canada: 1098-1103.
- [45] LUO Z. A thermal model for IGBT modules and its implementation in a real time simulator[D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2002.
- [46] 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.
- [47] 邓二平. 压接型 IGBT 器件内部电—热—力多物理场耦合模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
DENG Erping. Modelling the electro-thermo-mechanical multi-physics coupling model for press pack IGBTs[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [48] XU Y, HO C N M, GHOSH A, et al. An electrical transient model of IGBT-diode switching cell for power semiconductor loss estimation in electromagnetic transient simulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(3): 2979-2989.
- [49] DU X, ZHANG J, ZHENG S, et al. Thermal network parameter estimation using cooling curve of IGBT module[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(8): 7957-7971.
- [50] 杨舒萌, 孙鹏菊, 杜雄, 等. 基于组合短路电流的不受老化影响的 IGBT 模块结温测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5770-5779.
YANG Shumeng, SUN Pengju, DU Xiong, et al. Junction temperature measurement of IGBT based on combined short-circuit current that not affected by aging effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5770-5779.
- [51] BĘCZKOWSKI S, GHIMRE P, DE VEGA A R, et al. Online Vce measurement method for wear-out monitoring of high power IGBT modules[C] // 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), September 2-6, 2013, Lille, France: 1-7.
- [52] DU M, TANG Y, GAO M, et al. Online estimation of the junction temperature based on the gate pre-threshold voltage in high-power IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2019, 19(3): 501-508.
- [53] LUO H, CHEN Y, SUN P, et al. Junction temperature extraction approach with turn-off delay time for high-voltage high-power IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(7): 5122-5132.
- [54] CHEN Y, LUO H, LI W, et al. Analytical and experimental investigation on dynamic thermo-sensitive electrical parameter with maximum dic/dt during turn-off for high power trench gate/field-stop IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(8): 6394-6404.
- [55] 郭远欣, 王学梅, 张波. 一种改进的 IGBT 模块结温提取算法及实验研究[J]. 电源学报, 2021, 19(1): 205-214.
GUO Yuanxin, WANG Xuemei, ZHANG Bo. Improved IGBT module junction-temperature extraction algorithm and experiment[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(1): 205-214.
- [56] CHEN B, LU G, FANG H, et al. IGBT neural network prediction method of radar transmitter based on Levenberg-Marquard optimization[J]. International Journal of Future Generation Communication and Networking, 2016, 9(9): 1-14.
- [57] CHEN M, XU S, RAN L, et al. Prediction of case temperature for monitoring IGBT power module using artificial neural network[J]. International Reversion and Electric Engineering, 2012, 7(1): 3240-3247.
- [58] LI L L, SUN J, TSENG M L, et al. Extreme learning machine optimized by whale optimization algorithm using insulated gate bipolar transistor module aging degree evaluation[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 127: 58-67.
- [59] 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.
- [60] LEBEY T, MALEC D, DINCULESCU S, et al. Partial discharges phenomenon in high voltage power modules[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4): 810-819.
- [61] FU P, ZHAO Z, LI X, et al. Partial discharge measurement and analysis in PPIs[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(1): 138-146.
- [62] 祝令瑜, 占草, 刘琛硕, 等. 高压 IGBT 劣化机理分析及状态监测技术研究综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 903-916.
- ZHU Lingyu, ZHAN Cao, LIU Chenshuo, et al. Review of deterioration mechanism analysis and condition monitoring technology for high voltage IGBT[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 903-916.
- [63] LIU C, LIU Z, ZHAN C, et al. An online monitoring scheme for partial discharge signal of sub-module IGBTs used in MMC[C] // 2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), October 25-28, 2020, Phuket, Thailand: 230-233.
- [64] 周刚. 基于卡尔曼滤波算法的 MMC 子模块 IGBT 在线监测方法[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 224-229.
- ZHOU Gang. On-line monitoring method for MMC submodule IGBT based on Kalman filtering algorithm[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2020, 48(2): 224-229.
- [65] 姚芳, 王少杰, 李志刚. IGBT 结温获取方法及其讨论[J]. 电测与仪表, 2017, 54(12): 42-48.
- YAO Fang, WANG Shaojie, LI Zhigang. Review of IGBT junction temperature acquisition method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(12): 42-48.
- [66] 吉攀攀, 胡四全, 廖志军, 等. 柔性直流输电换流阀运行状态在线监测系统[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 68-72.
- JI Panpan, HU Siquan, LIAO Zhijun, et al. Design of an on-line monitoring system for HVDC flexible valve[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 68-72.
- [67] 郑文迪, 周腾龙, 邵振国, 等. 模块化多电平换流器 IGBT 状态参数在线监测方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22): 120-125.
- ZHENG Wendi, ZHOU Tenglong, SHAO Zhenguo, et al. An online monitoring method for IGBT state parameters of modular multilevel converter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22): 120-125.
- [68] SON G T, LEE S H, PARK J W. Power loss modeling of individual IGBT and advanced voltage balancing scheme for MMC in VSC-HVDC system[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2014, 9(5): 1471-1481.
- [69] 薛英林, 徐政, 张哲任, 等. 采用不同子模块的 MMC-HVDC 阀损耗通用计算方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 20-29.
- XUE Yinglin, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. General method of valve loss calculation for MMC-HVDC with different submodules[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 20-29.
- [70] 饶宏, 李建国, 宋强, 等. 模块化多电平换流器直流输电系统损耗的计算方法及其损耗特性分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 101-106.
- RAO Hong, LI Jianguo, SONG Qiang, et al. Loss calculation method and characteristics analysis for MMC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 101-106.
- [71] 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.
- [72] ZHANG Yi, WANG Huai, WANG Zhongxu, et al. Simplified thermal modeling for IGBT modules with periodic power loss profiles in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2323-2332.
- [73] 王希平, 李志刚, 姚芳. MMC 系统功率器件基频结温波动快速计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5805-5816.
- WANG Xiping, LI Zhigang, YAO Fang. Simplified estimation of the fundamental frequency junction temperature fluctuation for IGBTs in modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5805-5816.
- [74] XIAO L, ZHAO Y, JI B, et al. Transient junction temperature prediction of IEGT in modular multilevel converter sub-module based on FEM[C] // The 16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2020), July 2-3, 2020: 1127-1133.
- [75] 周竞宇, 赵宇, 胡雨龙, 等. MMC-HVDC 系统功率器件的结温估算与寿命预测[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(5): 24-32.
- ZHOU Jingyu, ZHAO Yu, HU Yulong, et al. Research on junction temperature estimation and life prediction of power devices in MMC-HVDC system[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 24-32.

收稿日期: 2022-04-13; 修回日期: 2022-07-11

作者简介:

阳同光(1974—), 男, 博士, 教授, 研究方向为配电网状态监测、故障诊断、变流器控制等; E-mail: yangtongguang1@163.com

沈兵(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电系统状态监测、故障诊断。E-mail: 2917847800@qq.com

(编辑 许威)