

储能变流器电容板过电压失控暂态研究

刁 群

(新源智储能源发展(北京)有限公司, 北京 102400)

摘 要 在“双碳”背景下, 新能源装机蓬勃发展, 而储能是解决清洁能源对网侧不稳定的规模化核心技术, 对维持电力系统的稳定性和灵活性具有重要作用。全球储能产业加速向多元化、智能化转型, 在可再生能源并网及微电网、电网调峰提效等领域发挥关键作用。然而, 作为储能交直流能源转换关键装置之一的储能变流器, 常发生减负载、跳闸、IGBT 模块损坏电弧拉燃等情况。本文通过对一起典型的储能电站用 2 500 kW 储能变流器故障后的仿真模拟进行分析, 探知故障下暂态的电流、电压波形变化, 对此类故障的共性特征进行深入归纳分类, 并提出早期预警方法和解决方案, 以期为实现储能变流器的安全稳定运行提供有益参考。

关键词 储能变流器; 过电压; 暂态仿真; 预警防范

基金项目: 中国电力 C 类科技项目 (项目编号: ZGDL-KJ-2025-C032)。

中图分类号: TM464; TM712; TM732 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.003

0 引言

储能技术是构建新型电力系统、保障能源安全、实现“双碳”目标的关键。以电化学储能为代表的新型储能具有调节速度快、布置灵活、建设周期短等特点, 在可再生能源并网及微电网、电网调峰提效等中的应用发挥着关键作用。而储能变流器 (以下简称 PCS) 作为电池舱直流电与网侧交流电双向转换的核心部件, 用于控制电池的充电和放电过程, 进行交直流的变换。PCS 在电池储能系统中成本约占比 15% ~ 20%, 是电池储能系统的关键环节, 其可靠性和安全性是制约整个储能系统平稳运行的因素。据统计, 目前在运行储能电站故障中, PCS 故障约占 30%, 其存在故障隐蔽性, 常在故障发生后 IGBT 模块多发生爆燃、炸损, 故障痕迹容易模糊消失, 故障原因较难分析, 本文从 PCS 吸收电容板故障出发, 分析该过程对 PCS 运行的影响, 并针对性地提出解决方案, 从根源上解决此类故障, 从而提高设备可靠性。

2024 年 12 月, 某集团 200 MW · h 储能项目接受调度指令并开始执行满功率放电时, PCS 报“驱动故障、母线电流过流、逆变软件过流”等告警, 工作人员现场检查发现 PCS 功率模块有明显放电痕迹, 模块有拉弧烧焦现象。该事件最终定损, 需要更换 PCS 支路功率模块 3 个, BMS 电池舱高压箱内熔断器、接触器需更换各 18 个, 汇流柜熔断器需更换 1 个, 该事件直接经济损失 20 万元, 连带直接电量损失及电网考核。该次事件最终确定为吸收电容板的焊盘溢锡导致母线之间

的安规绝缘不足, 引发短路放电。该故障隐蔽, 发生时间短, 带来的次生危害性大。因此, 本文通过开展故障模块和同批次产品仿真对比试验, 采集不同阶段电压、电流波形特征进行暂态研究。在此基础上, 从实际工程应用角度出发提出了 PCS 的预警防控策略。

1 实验设置

1.1 试验样品准备

因故障发生后 IGBT 模块发生短时热量聚集及燃弧损伤, 直接故障点不易发现, 分析思路是通过软件和硬件复现故障现场, 对比故障时的波形图, 通过结论法逐一排除非相似项, 最终定位故障原因^[1]。试验准备同批次 IGBT 驱动模块, 模块单体尺寸为 110 × 80 mm, 准备恒定电流和电压源, 其他仪器包括录波器、万用表等。

1.2 故障录波分析

通过故障录波得知, 在 A 时刻发生异常, 保护逻辑动作, PCS 封锁脉冲; 在 B 时刻, B 相与 C 相形成环流, 半母线电压发生抖动, 抖动频率为 100 Hz, 在 125 ms 后的 E 时刻直流母线发生短路, 这时三相发生不控整流, 表象为电池舱高压箱熔断器熔断。

1.3 故障实物分析

从故障的 IGBT 主板看, A 相主要异常点在二极管上, 各 IGBT 管焊点工艺正常, 支撑绝缘子受短路应力影响损坏; B 相 T1 晶圆损坏发黑, T4 与 T6 管 IGBT 内部焦黑损坏, T2 与 T3 管整体损坏, T1 与 T5 管二极管档位测量正常且 D5 二极管档位与正常管相近, D1 二极

管压降偏高,各 IGBT 管焊点工艺正常,支撑绝缘子正常;C 相 T6 二极管异常,T1 晶圆焦黑,D1 阻抗无穷大,T2 与 T3 管整体损坏,T5 二极管压降 0.359 V,各 IGBT 管焊点工艺正常,支撑绝缘子正常。

2 试验结果与分析

通过录波图和故障设备实物测量分析依旧不能确定故障原因,本节进行软件原因分析,并针对内管异常进行逐一测试。

2.1 软件封脉冲驱动时序异常导致内管异常测试

通过软件逻辑模拟因软件类故障导致的封脉冲现象,通过对 T1 驱动电流、T2 驱动电流、T3 驱动电流、逆变电流在放电状态下的波形和故障断点情况分析得出的结论是,模拟 PWM 总使能信号干扰测试下,运行过程中软件误封脉冲不会导致 IGBT 损坏^[2]。

2.2 硬件封脉冲驱动时序异常导致内管异常排查

测试异常封锁后的驱动波形测试,异常封锁(硬件)驱动时,电流电压波形未发生畸变,波形及逻辑均反馈正常,并且 IGBT 未损坏,无异常放电烧焦等痕迹^[3]。

2.3 反向电压尖峰超标导致 IGBT 内管异常排查

通过测试满功率状态下 IGBT 反峰测试,分别对 T1-T6 管反峰下的波形进行录波分析,内外管反峰均在合理范围内(器件要求反峰不超过 1 200 V),内管均未发生暂态过压而击穿损坏的现象。

2.4 双脉冲测试

直流电压 1 450 V 下测试 T1~T6 驱动、反峰、电流、电流上升/下降时间,IGBT 开通/关断时间、损耗,无异常现象(见表 1)。

表 1 双脉冲测试

测试项	驱动上 升沿	驱动下 降沿	反峰	峰值电流
	开通时间	开通延时	关断时间	关断延时
T1	正常	正常	Δ 194.4 V/741.6 V	678 A
	1.13 us	0.86 us	0.838 us	0.77 us
T2	正常	正常	Δ 291.6 V/734.4 V	636.8 A
	1.23 us	0.86 us	1.8 us	1.53 us
T3	正常	正常	Δ 313.2 V/730.8 V	729 A
	0.692 us	0.540 us	2.268 us	1.992 us
T4	正常	正常	Δ 270 V/745.2 V	618 A
	1.076 us	0.820 us	1.132 us	1.084 us
T5	正常	正常	Δ 208 V/727.2 V	657 A
	1.31 us	0.96 us	1.75 us	1.62 us
T6	正常	正常	Δ 97.2 V/734.4 V	627 A
	1.33 us	0.99 us	1.872 us	1.664 us

2.5 驱动参数不合理导致 IGBT 异常排查

软件设计(见图 1)自查,驱动配置、驱动保护、故障封锁逻辑和定值均导入正常,与初始设定值无差异,均未发现异常^[4]。因此,排除驱动参数设置不合理导致的故障情况。

2.6 IGBT 晶圆过温损伤异常排查

该型 IGBT 模块内部发热量最大的 IGBT 芯片或 FWD 芯片正下方的铜底座下温度极致为 125 ℃,通过满载

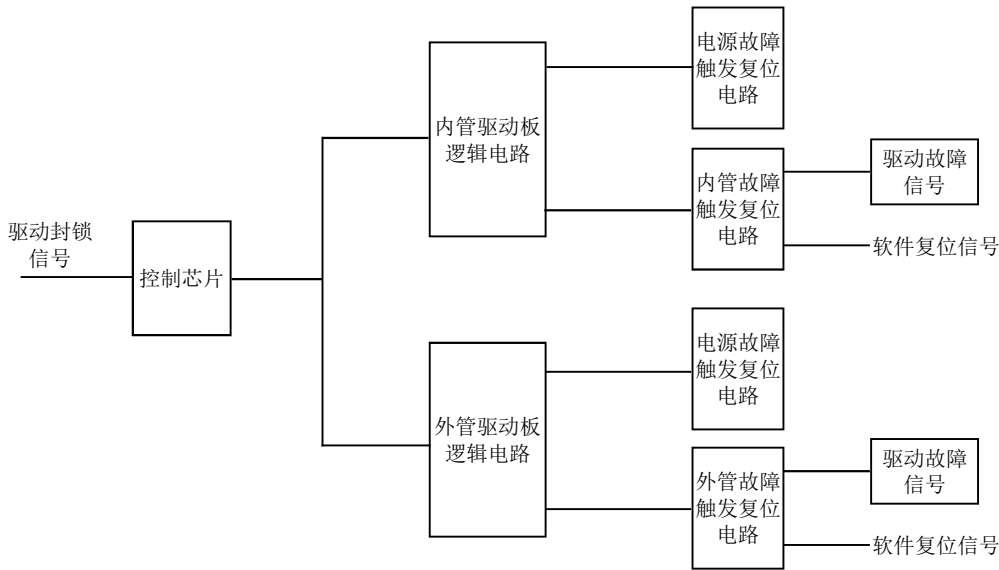


图 1 软件设计图

运行热点测试,主要以温度规格较低的芯片器件为主,经温升测试,规格未超标,温度无异常(见表2)。因此排除 IGBT 晶圆过温损伤导致的故障情况。

表2 温升测试

测试项	叠加温度/℃	规格/℃
内管驱动光耦环温	54.39	/
光耦	51.06	85
驱动光耦	55.93	85
电源芯片	57.12	80
光耦	54.82	85
比较器	56.38	85
环温	45.00	/

2.7 器件温度规格超标导致的 IGBT 驱动电路异常

通过高压 1 500 V 逆变基整流满载试验,验 IGBT 叠加温度至 126.57 ℃,达到允许极值以上温度,驱动电路无异常。

2.8 IGBT 自身异常导致

通过 IGBT 溯源检查,得出 B 相 B-9/12 绝缘失效为芯片破坏后的二次损坏,同批次抽查均为正常。因此第一故障点非 IGBT 本身故障引发,排除 IGBT 本身异常导致。

2.9 对其他板卡进行排查

对 B 相电容板拆开电容后检查发现底部有拉弧痕迹, N 对 BUS-, 对应 T6 和 T4 管位置处,进一步拆解发现有溢锡现象。除 B 相电容板外的其他板卡检查均无异常现象。初步怀疑因 B 相电容板波峰焊溢锡导致绝缘能力降低引发暂态过电压。

3 故障验证

3.1 对 B 相电容板拉弧进行复盘验证

B 相电容板有拉弧痕迹,主要是中点 N 与 BUS- 拉弧,导致在发生异常 A 时刻,负半母线轻微抖动 B 相 T6 管短路后,出现过流,脉冲封锁。在异常录波的 B、D 时刻,通过 T6 管和 T3 管(不排除 T3 管在拉弧过程中同时异常),形成回路,电流互灌,由于电压和电流均被电池吸收,使得中点电压震荡(由仿真看出,当 T6 异常半母线电压上升, T3 异常半母线电压下降,形成震荡),直到母线短路,异常扩散。仿真后的波形能够与现场故障录波吻合对应。异常原因为电容板溢锡导致绝缘

异常,最终引发短路击穿,拉弧导致 IGBT 模块损坏。

3.2 电容板溢锡原因分析

波峰焊是让插件板的焊接面直接与高温液态锡接触达到焊接目的,其高温液态锡保持一个斜面,并由特殊装置使液态锡形成一道道类似波浪的现象,所以叫“波峰焊”,其主要材料是焊锡条^[5]。波峰焊高度正常设置值在 1/4 ~ 3/4 之间,此状态波峰高度为正常,当波峰高度低于 PCB 板厚度 1/4 时,有空焊风险,当波峰高度高于 PCB 板厚度 3/4 时,有溢锡风险。而异常电容 PCB 板厚为 2.0 mm,按照中间值 2/4 的波高预计浸锡高度在 1 mm 左右,实际治具中间下沉部位最大约 1.1 mm, 1+1.1=2.1 mm,理论值浸锡高度达到 105%,超过上限,有概率造成溢锡风险。经过调查,该焊接板供应商其治具存在老化形变,投产工艺采用的是 3 块板拼板过波峰,而工装的形变的最大量在中间,造成溢锡。

4 结论

通过对单次 PCS 故障全过程分析,最终找到故障原因,并结合故障分析结果提出解决方案,措施包括更新制作规范与验收规范,对治具的验收进行要求并记录验收结果;取消治具过波峰焊,改为裸板直接过波峰焊;修订《DIP 首件检验记录表》,使用 X-RAY 检验,确认电容是否有底部溢锡等,通过这些控制措施,从根源上解决此类故障,也为同类型故障迅速查找提供了产业经验,进而提高设备可靠性,降低同类故障发生率。

参考文献:

- [1] 刘牛. 电网侧储能电站变流器 PCS 运行故障分析[J]. 集成电路应用, 2020, 37(03): 56-57.
- [2] 国家标准化管理委员会. 储能变流器检测技术规程(GB/T 34133-2023)[S]. 2023-12-28.
- [3] 刘泽浩, 肖岚. 模块化多电平变流器 IGBT 开路故障诊断与定位方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(04): 1501-1516, 中插 21.
- [4] 陈豪, 白恺, 董建明, 等. 锂电池储能单元状态评估及故障诊断方法研究[C]. 2015 年中国电机工程学会年会, 2015.
- [5] 胡涛, 周信芳, 郑俊彬, 等. 波峰焊引发的 PCBA 翘曲仿真分析及对策[J]. 汽车工艺与材料, 2023(12): 20-25.