



中华人民共和国国家标准

GB/T 31487.3—2025

代替 GB/T 31487.3—2015

直流融冰装置 第3部分：试验

Direct current deicers—Part 3 : Tests

2025-12-31 发布

2026-07-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

引言 V

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 型式试验和例行试验 1

 4.1 电网换相直流融冰装置 1

 4.2 模块化多电平直流融冰装置 7

5 现场试验..... 13

 5.1 设备试验 13

 5.2 分系统试验 17

 5.3 系统试验 18

6 维护试验..... 26

 6.1 通则 26

 6.2 开路试验 26

 6.3 零功率试验 26

 6.4 带线路运行试验 26



前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/T 31487《直流融冰装置》的第 3 部分。GB/T 31487 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：系统设计；
- 第 2 部分：换流器；
- 第 3 部分：试验。

本文件代替 GB/T 31487.3—2015《直流融冰装置 第 3 部分：试验》，与 GB/T 31487.3—2015 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 更改了“范围”(见第 1 章，2015 年版的第 1 章)；
- 删除了引自第 1 部分和第 2 部分的术语(见 2015 年版的 3.1～3.22)；
- 删除了水冷却设备、串联电抗器、电容器和晶闸管阀低压通电试验的型式试验和例行试验要求(见 2015 年版的 4.2、4.7、4.8 和 4.12)；
- 删除了换流变压器、直流电压测量装置、直流电流测量装置、控制保护装置、平波电抗器、交流断路器、隔离开关和接地开关型式试验和例行试验的规定(2015 年版的 4.3～4.7、4.9 和 4.10)；
- 增加了模块化多电平直流融冰装置型式试验和例行试验(见 4.2)；
- 更改了电网换相直流融冰装置系统试验中带电跳闸试验、开路试验、零功率试验和带线路运行试验的规定(见 5.3.2.5～5.3.2.8，2015 年版的 5.3.3～5.3.7)；
- 增加了模块化多电平直流融冰装置现场试验的规定，分系统试验的概述、控制保护装置信号检查、其他测控装置和继电保护装置信号检查以及融冰顺序控制试验的规定，直流融冰装置不带电系统试验、交流滤波器带电试验、换流变压器带电试验、换流器带电试验和静止无功补偿功能试验的规定，模块化多电平直流融冰装置系统试验的规定(见 5.1.2、5.3.3、5.2.1～5.2.2、5.2.4、5.2.6、5.3.2.1～5.3.2.4、5.3.2.9 和 5.3.3)；
- 删除了换流变压器、直流电压测量装置、直流电流测量装置、控制保护装置、平波电抗器、断路器、隔离开关、接地开关和其他设备现场试验的规定，水冷却设备和电容器现场试验、滤波器调谐试验、晶闸管阀低压通电试验、电网换相直流融冰装置系统试验中冲击合闸试验规定(见 2015 年版的 5.1.3～5.1.7、5.1.9～5.1.11、5.1.2、5.1.8、5.2.1、5.2.2 和 5.3.2)。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国电力电子系统和设备标准化技术委员会(SAC/TC 60)归口。

本文件起草单位：南方电网科学研究院有限责任公司、西安高压电器研究院股份有限公司、电力规划总院有限公司、贵州电网有限责任公司电力科学研究院、西安电力电子技术研究所有限公司、中国南方电网有限责任公司、中国南方电网有限责任公司超高压输电公司、南京南瑞继保电气有限公司、北京四方继保自动化股份有限公司、中电普瑞科技有限公司、中国能源建设集团南京线路器材有限公司、中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司、南方电网新型电力系统(北京)研究院有限公司、广州高澜节能技术股份有限公司、许继电气股份有限公司、河南晶锐冷却技术股份有限公司、西安西电电力系统有限公司、广东电网有限责任公司电力科学研究院、国网浙江省电力有限公司电力科学研究院、云南电网有限责任公司电力科学研究院、中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司、中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司、中国电力科学研究院有限公司、南方电网能源发展研究院有限责任公

司、中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司、福州大学、清华四川能源互联网研究院、国网四川省电力公司电力科学研究院、南方电网电力科技股份有限公司、广东福德电子有限公司、西南交通大学、国网福建省电力有限公司电力科学研究院、国网山西省电力公司电力科学研究院、广东电网有限责任公司、国网江西省电力有限公司电力科学研究院、天津大学、哈尔滨工业大学、华北电力大学、湖南长高高压开关有限公司、明珠电气有限公司、湖南福德电气有限公司、特变电工衡阳变压器有限公司。

本文件主要起草人：魏伟、辛清明、许钊、傅闯、雷鸣、杨晓辉、李欢、周月宾、周会高、毛先胤、钟尧、王皆庆、任孟干、蔚红旗、冯俊杰、刘涛、李凌飞、侯婷、代书龙、黄超、董添华、邹常跃、赵晓斌、许树楷、王秀环、曾华荣、李婧靓、李英、秦康、李长伟、曹鹏、杨旗、唐金昆、徐望圣、奚鑫泽、洪权炜、田杰、张翔、许建中、雷鸣、刘伟、张雪垠、班国邦、廖名洋、吴越、杨柳、熊岩、万启发、谢惠藩、李应宏、张怿宁、方红伟、龚博、李昊、王泽昊、李斌、王立平、何佳伟、张露松、张建平、王琦、李彬彬、高勇、王强、陈锐、王小岭、梁宁、王成昊、王杰峰、马晓红、廖汉卿、刘湘、周陈韬、刘劲松、付峥争、吴有、彭向阳、林旭涛、黄石华、任孝东、饶斌斌、卢仰泽、林才华、赵琳、黄桂灶、杨勇、李琦、何鑫、侯小平、王金柯、胡永雄、吴奇钢、熊水林、王立华、丘森生。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

- 本文件于 2015 年首次发布为 GB/T 31487.3—2015；
- 本次为第一次修订。



引 言

覆冰是电网最严重的威胁之一,输电线路覆冰无法避免,及时除冰是保证电网安全的有效手段,对覆冰导线和地线通入电流加热融冰是应对输电线路倒塔断线的可行方法。2008 年冰灾造成我国电网设备大量损毁,引发大面积停电,我国电力科技工作者成功研制出了电流精准控制的电网换相换流器的直流融冰装置,进而对电网换相直流融冰装置设计、制造、检测验收和运行维护等技术进行了全面研发。为确保直流融冰装置功能要求、性能指标、检验方法等技术规定在设计、生产和使用中有共同遵守的依据,我国建立了直流融冰装置技术条件的标准体系。该系列标准 10 多年实际应用表明,适时开展直流融冰对保证输电线路和杆塔不受损害、减少线路跳闸、保证系统安全有极其重要的作用,既能有效减少冰冻造成的电网设备破坏,避免大面积断线倒塔,又可显著降低电网建设的造价。近年来,随着新一代电网友好型直流融冰装置——模块化多电平直流融冰装置、输电线路架空地线和光纤复合架空地线融冰技术、输电线路不停电地线融冰技术、覆冰导线和地线快速接入融冰电源的开关设备的成功研发及推广应用,需要将直流融冰技术创新成果融入技术标准,进一步提升直流融冰技术标准水平,修订了 GB/T 31487《直流融冰装置》。由于篇幅原因以及使用者需求不同,GB/T 31487 拟由三个部分构成。

- 第 1 部分:系统设计。目的在于明确直流融冰装置的系统设计、检验、运行和维护要求。
- 第 2 部分:换流器。目的在于明确直流融冰装置中电网换相换流器和模块化多电平换流器的技术要求。
- 第 3 部分:试验。目的在于明确直流融冰装置的试验方法。

本次对 GB/T 31487 的修订,主要增加了模块化多电平直流融冰装置、输电线路架空地线和光纤复合架空地线融冰、输电线路不停电地线融冰、覆冰导线和地线快速接入融冰电源的开关设备等的设计、检验规则和试验方法。



直流融冰装置 第3部分:试验

1 范围

本文件描述了直流融冰装置型式试验、例行试验、现场试验和维护试验的方法。

本文件适用于 110 kV 及以上交流输电线路导线和地线、直流输电线路地线融冰的电网换相直流融冰装置和模块化多电平直流融冰装置,其他类型直流融冰装置参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 1094.1—2013 电力变压器 第1部分:总则
GB/T 1094.3—2017 电力变压器 第3部分:绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙
GB/T 1094.4—2005 电力变压器 第4部分:电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则
GB/T 1094.11—2022 电力变压器 第11部分:干式变压器
GB/T 7354—2018 高电压试验技术 局部放电测量
GB/T 16927.1 高电压试验技术 第1部分:一般定义及试验要求
GB/T 20297 静止无功补偿装置(SVC)现场试验
GB/T 20990.1—2020 高压直流输电晶闸管阀 第1部分:电气试验
GB/T 25092—2010 高压直流输电用干式空心平波电抗器
GB/T 31487.1—2025 直流融冰装置 第1部分:系统设计
GB/T 31487.2—2025 直流融冰装置 第2部分:换流器
GB/T 33348—2024 高压直流输电用电压源换流器阀 电气试验
GB/T 37008—2018 柔性直流输电用电抗器技术规范
GB 50150 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准
GB 50171 电气装置安装工程 盘、柜及二次回路接线施工及验收规范
DL/T 1215.4 链式静止同步补偿器 第4部分:现场试验

3 术语和定义

GB/T 31487.1—2025 和 GB/T 31487.2—2025 界定的术语和定义适用于本文件。

4 型式试验和例行试验

4.1 电网换相直流融冰装置

4.1.1 晶闸管阀

4.1.1.1 阀支架直流电压试验

阀支架直流电压试验的试品为阀支架。

阀支架直流电压试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 6.3.2 进行,但做如下补充:

出现在阀支架上的稳态运行电压直流分量的最大值 U_{dms} , 12 脉动换流器取值为 $\sqrt{2}U_{v0} \cdot \cos 15^\circ$, 6 脉动换流器取值为 $\sqrt{2}U_{v0}$ 。其中, U_{v0} 为换流变压器阀侧相对相空载电压(不包括谐波电压)。

4.1.1.2 阀支架交流电压试验

阀支架交流电压试验的试品为阀支架。

阀支架交流电压试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 6.3.3 进行,但做如下补充:

- a) 稳态运行期间施加在阀支架的最大重复运行电压的峰值 U_{ms} 考虑最大换相过冲量, 12 脉动换流器取值为 $1.25 \times \sqrt{2}U_{v0} \cdot \cos 15^\circ$, 6 脉动换流器取值为 $1.25 \times \sqrt{2}U_{v0}$;
- b) 1 min 试验, 暂态过电压因数 $k_r = 1.3$ 。

4.1.1.3 阀支架雷电冲击试验

阀支架雷电冲击试验的试品为阀支架。

在阀的两个主端子对公共地之间施加 3 次正极性和 3 次负极性雷电冲击电压。

应采用符合 GB/T 16927.1 的标准雷电冲击电压波形。

试验电压应为直流融冰装置的绝缘配合研究确定的雷电冲击保护水平。

4.1.1.4 多重阀单元对地直流电压试验

多重阀单元对地直流电压试验的试品为多重阀单元。

多重阀单元对地直流电压试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 7.3.1 进行。但做如下补充:

出现在多重阀单元高压端子对地间的稳态运行电压直流分量的最大值 U_{dmm} , 12 脉动换流器取值为 $\sqrt{2}U_{v0} \cdot \cos 15^\circ$, 6 脉动换流器取值为 $\sqrt{2}U_{v0}$ 。

4.1.1.5 多重阀单元交流电压试验

多重阀单元交流电压试验的试品为多重阀单元。

多重阀单元交流电压试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 7.3.2 进行。但做如下补充:

- a) 稳态运行期间多重阀单元端子之间出现的最大重复运行电压的峰值 U_{mm} 考虑最大换相过冲量, 12 脉动换流器取值为 $1.25 \times \sqrt{2}U_{v0} \cdot \cos 15^\circ$, 6 脉动换流器取值为 $1.25 \times \sqrt{2}U_{v0}$;
- b) 1 min 试验, 暂态过电压因数 $k_r = 1.3$ 。

4.1.1.6 多重阀单元雷电冲击试验

多重阀单元雷电冲击试验的试品为多重阀单元。

多重阀单元雷电冲击试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 7.3.4 进行。但做如下更改:

“考虑到多重阀单元高压端子与地之间避雷器时, 由绝缘配合所决定的雷电冲击保护水平”改为“由直流融冰装置绝缘配合研究确定的雷电冲击保护水平”。

4.1.1.7 阀直流电压试验

阀直流电压试验的试品为晶闸管阀。

阀直流电压试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 8.3.1 进行。

4.1.1.8 阀交流电压试验

阀交流电压试验的试品为晶闸管阀。

阀交流电压试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 8.3.3 进行,但做如下更改:

- a) 暂态过电压因数 k_r 取 1.3;
- b) 反向换相过冲因数 k_c 取 1.25。

4.1.1.9 阀操作冲击试验

阀操作冲击试验的试品为晶闸管阀。

阀操作冲击试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 8.3.5 进行,但做如下更改:

- a) “阀避雷器的操作冲击保护水平”更改为“由直流融冰装置绝缘配合研究确定的操作冲击保护水平”;



- b) 试验安全因数 k_{10} 取 1.1。

4.1.1.10 最大持续运行负载试验

最大持续运行负载试验的试品为晶闸管阀。

最大持续运行负载试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 9.3.2 进行,但做如下更改:

- a) 试验比例因数 k_n 取 1;
- b) 阀的触发电压 u_f 不考虑逆变器工况,不低于整流器阀触发电压 U_{fr} ;
- c) 阀的预期恢复阶跃电压 u_r 不考虑逆变器工况,取值为不低于整流器恢复阶跃电压。

4.1.1.11 最小触发角试验

最小触发角试验的试品为晶闸管阀。

最小触发角试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 9.3.4.2 进行,但做如下补充:

- a) 整流器最小触发角 α 取 5° ;
- b) 持续时间为 2 h。

4.1.1.12 暂态欠电压试验

暂态欠电压试验的试品为晶闸管阀。

暂态欠电压试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 9.3.5 进行。但做如下补充:

- a) N_{int} 和 N_f 的比值取 1,即试验中串联晶闸管级的数量和一个完整阀串联晶闸管级的总数的比值直接取 1;
- b) 暂态欠电压运行持续时间取 1.2 s。

4.1.1.13 断续直流电流试验

断续直流电流试验的试品为晶闸管阀。

断续直流电流试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 9.3.6 进行,但做如下补充:

“整流器在最小 α 下以最小交流电压运行”中的最小触发角 α 取 5° 。

4.1.1.14 大角度大电流运行能力试验

大角度大电流运行能力试验的试品为晶闸管阀。

大角度大电流运行能力试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 9.3.3 进行,但做如下更改:

- a) 试验系统比例因数 k_n 取 1;
- b) 暂态过电压因数 $k_r=1.3$;
- c) 运行的持续时间不少于 2 h。

4.1.1.15 阀抗电磁干扰试验

阀抗电磁干扰试验的试品为晶闸管阀。

阀抗电磁干扰试验按照 GB/T 20990.1—2020 的第 12 章进行。

4.1.1.16 外观检查

外观检查的对象为晶闸管阀。

检查所有材料和部件是否完好,安装是否正确。

4.1.1.17 接线检查

接线检查的对象为晶闸管阀。

检查所有主要的载流接线是否正确连接。

4.1.1.18 均压电路检查

均压电路检查的对象为晶闸管阀。

检查均压电路参数,从而确认施加从直流到冲击波形的电压时,电压在串联的晶闸管上的分配是否正确。

4.1.1.19 耐受电压检查

耐受电压检查的对象为晶闸管阀。

检验晶闸管阀能耐受相应于对阀规定的最大值电压。检查包括操作冲击检查和工频试验电压检查。

4.1.1.20 局部放电检查

局部放电检查的对象为晶闸管阀。

局部放电检查施加的试验电压值不应低于晶闸管阀交流电压试验中 30 min 耐压试验的电压。

4.1.1.21 辅助设备检查

辅助设备检查的对象为晶闸管级上的辅助设备(例如监测和保护回路)和晶闸管阀公共部分。

检查每个晶闸管级上的辅助设备和晶闸管阀公共部分功能是否正常。

4.1.1.22 触发检查

触发检查的对象为晶闸管。

检查每个晶闸管级中的晶闸管是否正确地响应触发信号而导通。

4.1.1.23 压力检查

压力检查的对象为水冷却回路。

压力检查时,施加的液压不应低于设计压力的 1.2 倍,施加持续时间不应少于 30 min。

4.1.2 控制保护装置

4.1.2.1 功能和性能试验

4.1.2.1.1 通则

控制保护装置功能和性能试验宜在电力系统数字实时仿真系统上进行,采用的控制保护装置应与

现场一致,其他设备采用数字模拟的方式。功能和性能试验应在零功率模式、各导线融冰和各地线段融冰分别进行。

4.1.2.1.2 换流器带电试验

换流器带电试验检查换流器的冲击合闸耐受能力,同时校验换流器同步电压、预检信号。

通过闭合交流进线断路器对换流器带电,验证换流器与换流变压器之间的电气连接是否正常,带电过程有无异常现象。

4.1.2.1.3 跳闸试验

在电网换相直流融冰装置交流侧带电的情况下进行跳闸试验,在下列情况下,控制保护装置均应启动跳闸信号,断开交流侧断路器:

- a) 启动手动紧急停运功能;
- b) 模拟直流过电压故障;
- c) 模拟直流过电流故障;
- d) 模拟冷却系统故障;
- e) 模拟换流变压器故障。

4.1.2.1.4 开路试验

开路试验应在不带融冰线路的条件下进行,试验包括以下内容。

a) 手动模式开路试验

电网换相直流融冰装置交流侧带电,直流输出侧断开。手动设定开路试验的直流电压预定值(最大限制值为 1.05 倍额定值)和电压变化速率,手动启动直流电压升压程序将直流电压升至预定值。

在直流电压升降过程中,直流电压的升降可手动停止,任何情况下均可手动闭锁电网换相直流融冰装置。

试验结束后,手动降压,并闭锁电网换相直流融冰装置。

b) 自动模式开路试验

电网换相直流融冰装置交流侧带电,直流输出侧断开。启动预设的开路试验程序,程序全过程中自动执行以下操作:解锁电网换相直流融冰装置,将直流电压按一定变化速率升至预定值(最大限制值为 1.05 倍额定值),保持一段时间,然后将直流电压降至零,闭锁电网换相直流融冰装置。

直流电压预定值、电压变化速率和保持时间能预先设定。

在直流电压升降过程中,直流电压的升降可手动停止,任何情况下均可手动闭锁电网换相直流融冰装置。

4.1.2.1.5 启停试验

通过闭合交流进线断路器对电网换相直流融冰装置带电,设定电流参考值为零功率最小允许电流值,解锁电网换相直流融冰装置。验证电网换相直流融冰装置启动逻辑是否正确,交流侧和直流侧有无异常的过电压或过电流,交流电流相位、极性和测量值以及直流电流极性和测量值是否正确。

保持 5 min~10 min 后,发出电网换相直流融冰装置闭锁命令,验证电网换相直流融冰装置能否正常停运,检查交流侧和直流侧有无异常的过电压或过电流。

4.1.2.1.6 冗余切换试验

冗余切换试验对具有冗余功能的电网换相直流融冰装置进行,验证控制保护装置和辅助电源等的

冗余功能。冗余切换试验的对象通常包括：

- a) 控制保护装置；
- b) 辅助电源。

以最小允许电流值解锁电网换相直流融冰装置，模拟电网换相直流融冰装置主控制保护装置和辅助电源故障，验证冗余切换功能是否正确、冗余设备切换是否导致电气量出现异常波动、冗余切换后的状态及切换时间能否满足设计要求。

4.1.2.1.7 电流升降试验

通过闭合交流进线断路器对电网换相直流融冰装置带电，以最小电流参考值解锁电网换相直流融冰装置，在电流允许范围内设定电网换相直流融冰装置输出电流，在达到每个设定电流值后均保持 5 min~10 min，电流升降过程应无明显扰动。

监视设备运行参数，验证电网换相直流融冰装置是否稳定运行，交流母线电压、阀侧电流、直流电压、直流电流、触发角是否与设计值一致。

4.1.2.1.8 电流阶跃试验

通过闭合交流进线断路器对电网换相直流融冰装置带电，以最小电流参考值解锁电网换相直流融冰装置，将输出电流升至 0.5 倍额定值，保持 5 min~10 min，以施加电流指令值的方式使系统产生直流电流的阶跃（电流阶跃量宜选择 ± 0.3 p.u.）。

验证阶跃响应的响应时间和超调量能否满足设计要求，且无保护误动作，交流侧和直流侧有无异常的过电压和过电流。

4.1.2.1.9 额定电流试验

额定电流试验应根据现场环境温度对最大试验电流和试验时间进行修正。

通过闭合交流进线断路器对电网换相直流融冰装置带电，以最小电流参考值解锁电网换相直流融冰装置，将电网换相直流融冰装置输出电流逐步升至额定电流，运行 10 min，然后逐步降至最小电流，闭锁电网换相直流融冰装置。

试验过程中，验证设备运行状况是否正常，且电网换相直流融冰装置的以下数据是否满足设计要求：

- a) 输出直流电压、电流及功率；
- b) 输入交流电压和电流；
- c) 输入有功功率和无功功率；
- d) 输出直流电流的控制精度；
- e) 晶闸管阀触发延迟角；
- f) 损耗。

试验过程中，还应同时测量交流谐波。在电网换相直流融冰装置运行和退出状态，分别测量电网换相直流融冰装置接入点的谐波电流、谐波电压和各滤波器支路的谐波电流，验证滤波器吸收谐波的效果、滤波器设计是否在安全范围之内、接入点的谐波是否达到设计要求。

4.1.2.1.10 静止无功补偿功能试验

电网换相直流融冰装置兼有静止无功补偿功能时，按照 GB/T 20297 的要求进行静止无功补偿功能试验。

4.1.2.2 连续通电试验

控制保护装置在通过功能和性能试验后，进行 72 h 连续通电试验。试验期间，融冰电流的设定值

不应低于额定电流的 60%。

4.2 模块化多电平直流融冰装置

4.2.1 模块化多电平换流器

4.2.1.1 模块化多电平换流器阀

4.2.1.1.1 阀支架直流电压试验

阀支架直流电压试验的试品为阀支架。

阀支架直流电压试验按照 GB/T 33348—2024 的 7.3.1 进行。

4.2.1.1.2 阀支架交流电压试验

阀支架交流电压试验的试品为阀支架。

阀支架交流电压试验按照 GB/T 33348—2024 的 7.3.2 进行,但做如下更改:

“推导该过电压时,应把相避雷器或其他过电压保护措施(如果有)的过电压限制效应考虑在内”更改为“推导该过电压时,应把其他过电压保护措施(如果有)的过电压限制效应考虑在内”。

4.2.1.1.3 阀支架雷电冲击试验

阀支架雷电冲击电压试验的试品为阀支架。

试验应在阀的主端子(连接在一起)对地之间施加三次正极性和三次负极性雷电冲击电压。

应采用符合 GB/T 16927.1 的标准操作冲击电压波形。

试验电压按照直流融冰装置的绝缘配合选取。

试验水平的大气修正应符合 GB/T 33348—2024 中 4.2 的规定。

4.2.1.1.4 多重阀单元直流电压试验

多重阀单元直流电压试验的试品为多重阀单元。

多重阀单元直流电压试验按照 GB/T 33348—2024 的 8.3.1 进行。

4.2.1.1.5 多重阀单元交流电压试验

多重阀单元交流电压试验的试品为多重阀单元。

多重阀单元交流电压试验按照 GB/T 33348—2024 的 8.3.2 进行,但做如下更改:

“推导该过电压时,应把相避雷器或其他过电压保护措施(如果有)的过电压限制效应考虑在内”更改为“推导该过电压时,应把其他过电压保护措施(如果有)的过电压限制效应考虑在内”。

4.2.1.1.6 多重阀单元雷电冲击试验

多重阀单元雷电冲击试验的试品为多重阀单元。

多重阀单元雷电冲击试验按照 GB/T 20990.1—2020 的 8.3.4 进行。但做如下更改:

“考虑到多重阀单元高压端子与地之间避雷器时,由绝缘配合所决定的雷电冲击保护水平”更改为“由直流融冰装置绝缘配合研究确定的雷电冲击保护水平”。

4.2.1.1.7 阀交流-直流电压试验

阀交流-直流电压试验的试品为模块化多电平换流器阀。

阀交流-直流电压试验按照 GB/T 33348—2024 的 9.3.1 进行,但做如下补充:

- a) 试验比例因数 k_0 取 1, 短路冗余的子模块, 子模块短路的位置应由买方和卖方协商确定;
- b) “可考虑实际运行工况下, 由于过电压而装设的阀避雷器或极避雷器的限制作用”更改为“可考虑实际运行工况下, 由于过电压而装设的极避雷器的限制作用”。

4.2.1.1.8 阀操作冲击试验

阀操作冲击试验的试品为模块化多电平换流器阀。

阀操作冲击试验按照 GB/T 33348—2024 的 9.3.3 进行, 但做如下补充:

- a) 试验按照不带避雷器保护的阀进行;
- b) 试验比例因数 k_0 取 1, 应短路冗余的子模块, 子模块短路的位置应由买方和卖方协商确定。

若由于阀电气结构造成试验设备难以产生操作冲击电压, 可采用阀交流-直流电压试验替代, 试验电压值由买方和卖方协商确定。

4.2.1.1.9 最大连续运行负荷试验

最大连续运行负荷试验的试品为模块化多电平换流器阀或阀段。

最大连续运行负荷试验按照 GB/T 33348—2024 的 6.4 进行。

4.2.1.1.10 最大暂态过负荷运行试验

最大暂态过负荷运行试验的试品为模块化多电平换流器阀或阀段。

最大暂态过负荷运行试验按照 GB/T 33348—2024 的 6.5 进行。

4.2.1.1.11 最低直流电压试验

最低直流电压试验的试品为模块化多电平换流器阀或阀段。

最低直流电压试验按照 GB/T 33348—2024 的 6.6 进行。

4.2.1.1.12 功率器件过电流关断试验

功率器件过电流关断试验的试品为模块化多电平换流器阀或阀段。

功率器件过电流关断试验按照 GB/T 33348—2024 的第 10 章进行。

4.2.1.1.13 子模块旁路试验

子模块旁路试验的试品为从用于型式试验的每个阀段中选取的一个子模块, 具体受试子模块由买方和卖方协商确定。

试验前, 试品应在最大连续运行负荷试验条件下运行, 试验可通过模拟子模块故障考核旁路开关动作, 测试旁路触发信号发出到模块可靠旁路所需时间, 检查模块旁路过程中对外部电压电流的影响。若子模块内部带放电回路, 还应验证旁路开关与放电回路开关的保护动作逻辑配合。

4.2.1.1.14 阀抗电磁干扰试验

阀抗电磁干扰试验的试品为模块化多电平换流器阀。

阀抗电磁干扰试验按照 GB/T 33348—2024 的第 12 章进行。

4.2.1.1.15 外观检查

外观检查的对象为模块化多电平换流器阀。

检查所有材料和部件是否完好, 安装是否正确。

4.2.1.1.16 接线检查

接线检查的对象为模块化多电平换流器阀。

检查所有主要的载流接线是否正确连接。

4.2.1.1.17 均压电路检查

均压电路检查的对象为模块化多电平换流器阀。

检查均压电路参数,从而确认施加直流或冲击波形的电压时,电压在串联的子模块上的分配是否正确。

4.2.1.1.18 控制、保护和监测回路检查

控制、保护和监测回路检查的对象为阀的二次回路部分。

检查组成阀的主要部分的控制、保护和监测回路的功能,如 IGBT 栅极驱动电路和任何本地保护或监测回路。

4.2.1.1.19 耐受电压检查

检查阀部件能否耐受对阀规定的最高电压。应包括交流-直流试验电压和操作冲击试验电压(适用时)。

耐受电压检查的试验电压值不应低于功率器件标称电压的 70%。

4.2.1.1.20 局部放电检查

局部放电检查按照 GB/T 33348—2024 的 14.5.6 进行。

局部放电检查的试验电压值不应低于阀交流-直流电压试验中 3 h 耐压试验的电压。

4.2.1.1.21 开通/关断检查

开通/关断检查的对象为子模块。

检查每个子模块中功率器件,如 IGBT,按照开关命令正确地开通和关断。

4.2.1.1.22 压力检查

压力检查的对象为水冷却回路。

压力检查时,施加的液压不应低于设计压力的 1.2 倍,施加持续时间不应少于 30 min。

4.2.1.2 桥臂电抗器

4.2.1.2.1 绕组电阻测量

绕组电阻、测量的端子温度以及绕组温度都应予以记录。测量应采用直流。

在测量中,应将自感效应的影响降至最小。

测量前,环境温度变化小于 3℃ 的时间至少不应低于 3 h。用内部温度传感器测得的绕组温度与环境温度之差不应大于 2℃。

绕组温度应与绕组电阻同时测量,绕组温度由置于有代表性位置的传感器测量。

4.2.1.2.2 谐波电流损耗测量

电阻损耗等于 $I_h^2 R$, R 为直流电阻测量值, I_h 为谐波电流值。

应在工厂环境温度下,当直流电流为零时,在规定的谐波电流频谱中每个频率及电流下进行。测得

的损耗值按照 GB/T 1094.1—2013 校正到参考温度。

如果测量时的电流值不等于规定值时,则损耗值应通过乘以规定电流值与测量电流值之比的平方校正到规定的谐波电流频谱中相应的电流值。

可在额定频率下且高于额定电压的任何电压下测量。测量的损耗乘以额定电流与实测电流(降低电压下的)之比的平方就是额定电流下的损耗。

4.2.1.2.3 电感测量

试验时,试品与地面之间的距离不应小于试品绕组的半径,支撑物应由绝缘材料制作。地面下不应存在钢筋网等金属回路以及尺寸可和试品绕组直径相比拟的大型金属件。

对试品施加 50 Hz~2 500 Hz 范围内指定频率(除包括技术规范中明确的谐波电流频率外,至少应包括 50 Hz、600 Hz、1 200 Hz 和 2 500 Hz)交流电流,使用误差不超过 0.2% 的仪表测量出电抗并换算出各频率下的电感,判断电感量是否符合额定值及偏差范围要求。电感应以电流最大的特征谐波频率下的结果为准,其他频率下的电感可超过偏差范围,但 50 Hz 和 2 500 Hz 这两个频率下的各自电感量的相对偏差不应超过 5%。

空间电磁场和地网电位的波动可能会对大电感空心线圈的电感测量产生不确定的干扰,使某些测量结果出现较大的测量偏差。当电感测量值超过预期偏差极限时,宜重复测量 3 次,并取 3 次测量结果的平均值作为测量结果。

4.2.1.2.4 端对端雷电冲击试验

试验时,将电抗器安装在绝缘平台上,首先施加一次降低的雷电全波冲击耐受电压,然后施加 3 次额定雷电全波冲击耐受电压。电压的极性应为负极性。额定雷电全波冲击耐受电压应为用户规定的端对端雷电全波冲击耐受电压。降低的雷电全波冲击耐受电压应为额定雷电全波冲击耐受电压的 50%~75%。

应对电抗器绕组的每个端子进行试验,一端加压时,另一端经分流器接地。试验时应记录电压和电流波形图。每个端子的试验顺序如下:

- a) 一次降低电压的负极性雷电全波冲击;
- b) 三次负极性额定雷电全波冲击。

冲击电压波形应是标准雷电冲击波。

4.2.1.2.5 端对地雷电冲击试验

试验应按 GB/T 1094.3—2017 的第 13 章、GB/T 1094.4—2005 的第 7 章以及 GB/T 1094.11—2022 的 14.3.1 进行,应依次对每个端子进行冲击,试验时另一个端子应接地。本试验应分别在正极性和负极性冲击电压下进行。

如果绕组两个端子之间的绝缘要求与各端子对地的绝缘要求不同时,其冲击试验程序应由买方和卖方协商确定。

4.2.1.2.6 直流负载试验

直流负载试验应按照 GB/T 37008—2018 的 8.5.3.1 进行。

4.2.1.2.7 外施交流电压耐受试验

本试验应在 50 Hz 下进行。电压应施加于连接在一起的绕组各端子与地之间,试验时间为 1 min。

试验期间按 GB/T 1094.3—2017 中附录 F 的相关部分进行局部放电测量。所用测量设备应符合 GB/T 7354—2018 的规定,本试验持续时间为 1 h。

4.2.1.2.8 端对地操作冲击试验

端对地操作冲击试验应按照 GB/T 25092—2010 的 13.11 进行。

试验时,按运行方式将电抗器安装在由支柱绝缘子构成的绝缘支架上。

在绝缘支架上端与地之间的雷电全波冲击试验顺序如下:

- a) 一次正极性降低电压(50%~75%)的雷电全波冲击;
- b) 三次正极性额定操作全波冲击;
- c) 三次负极性额定操作全波冲击。

冲击电压波形应是标准操作冲击波。

在七次正极性和八次负极性操作冲击下,应不出现两次以上的沿面闪络现象。

4.2.1.2.9 直流温升试验

直流温升试验按照 GB/T 25092—2010 的 13.13 进行。

4.2.1.2.10 交流温升试验

交流温升试验按照 GB/T 37008—2018 的 8.5.2.2 进行。

4.2.2 控制保护装置

4.2.2.1 功能和性能试验

4.2.2.1.1 通则

控制保护装置功能和性能试验宜在电力系统数字实时仿真系统上进行,采用的控制保护装置应与现场一致,其他设备采用数字模拟的方式。

功能和性能试验应在零功率模式、带最长融冰线路及带最短融冰线路 3 种工况下分别进行。

4.2.2.1.2 换流器带电试验

模块化多电平换流器带电试验验证换流器的冲击合闸耐受能力以及换流器带电功能正常。

通过闭合交流进线断路器对换流器带电,验证带电时子模块充电是否正常、功能是否正常、阀控制保护装置工作是否正常。

4.2.2.1.3 跳闸试验

在模块化多电平直流融冰装置交流侧带电的情况下,验证控制保护装置故障跳闸的正确性。在下列情况下,控制保护装置应启动跳闸信号,断开交流侧断路器:

- a) 启动手动紧急停运功能;
- b) 模拟直流过电压故障;
- c) 模拟直流过电流故障;
- d) 模拟冷却系统故障。

4.2.2.1.4 开路试验

开路试验验证模块化多电平直流融冰装置的直流电压耐受能力、直流电压控制能力,模块化多电平直流融冰装置在额定直流电压下运行是否正常以及输出直流电压与设计值是否相符。

开路试验应在不带融冰线路的条件下进行,试验包括以下内容。

- a) 手动模式开路试验

模块化多电平直流融冰装置交流侧带电,直流输出侧断开。手动设定开路试验的直流电压预定值(最大限制值为 1.05 倍额定值)和电压变化速率,手动启动直流电压升压程序将直流电压升至预定值。

试验过程中,验证输出直流电压与设计值是否相符以及输出直流电压能够达到额定电压。

在直流电压升降过程中,直流电压的升降可手动停止,而直流电压应保持在停止时刻的值,且能根据需要进行继续升高或降低。任何情况下均可手动闭锁模块化多电平直流融冰装置。

试验结束后,手动降压,并闭锁模块化多电平直流融冰装置。

b) 自动模式开路试验

模块化多电平直流融冰装置交流侧带电,直流输出侧断开。启动预设的开路试验程序,程序全过程中自动执行以下操作:解锁模块化多电平直流融冰装置,将直流电压按一定变化速率升至预定值(最大限制值为 1.05 倍额定值),保持一段时间,然后将直流电压降至零,闭锁模块化多电平直流融冰装置。

直流电压预定值、电压变化速率和保持时间能预先设定。

试验过程中,验证输出直流电压与设计值是否相符以及输出直流电压能够达到额定电压。

在直流电压升降过程中,直流电压的升降可手动停止,而直流电压应保持在停止时刻的值,且能根据需要进行继续升高或降低。任何情况下均可手动闭锁模块化多电平直流融冰装置。

4.2.2.1.5 启停试验

通过闭合交流进线断路器对模块化多电平直流融冰装置带电,设定电流参考值为零功率最小允许电流值,解锁模块化多电平直流融冰装置。验证模块化多电平直流融冰装置启动逻辑是否正确,交流侧和直流侧有无异常的过电压或过电流,交流电流相位、极性和测量值以及直流电流极性和测量值是否正确。

保持 5 min~10 min 后,发出模块化多电平直流融冰装置闭锁命令,验证模块化多电平直流融冰装置能否正常停运,交流侧和直流侧有无异常的过电压或过电流。

4.2.2.1.6 冗余切换试验

冗余切换试验对具有冗余功能的模块化多电平直流融冰装置进行,验证控制保护装置和辅助电源等的冗余功能。冗余切换试验的对象通常包括:

- a) 控制保护装置;
- b) 辅助电源。

以最小允许电流值解锁模块化多电平直流融冰装置,模拟模块化多电平直流融冰装置主控制保护装置和辅助电源故障,验证冗余切换功能是否正确执行、冗余设备切换是否导致电气量出现异常波动、冗余切换后的状态及切换时间是否满足设计要求。

4.2.2.1.7 子模块冗余试验

以最小电流参考值解锁模块化多电平直流融冰装置,在换流器的任一阀上使子模块逐一旁路,直至子模块旁路个数多于阀内子模块冗余数。

当子模块旁路个数未超过阀内子模块冗余数时,模块化多电平直流融冰装置应保持稳定运行;超过阀内子模块冗余数后,模块化多电平直流融冰装置应立即跳闸。

4.2.2.1.8 电流升降试验

通过闭合交流进线断路器对模块化多电平直流融冰装置带电,以最小电流参考值解锁模块化多电平直流融冰装置,在电流允许范围内设定模块化多电平直流融冰装置输出电流,在达到每个设定电流值后均保持 5 min~10 min,电流升降过程应无明显扰动。

监视设备运行参数,验证模块化多电平直流融冰装置是否稳定运行,交流侧电压和电流、直流侧电压和电流、子模块电容电压是否与设计值一致。

4.2.2.1.9 电流阶跃试验

通过闭合交流进线断路器对模块化多电平直流融冰装置带电,以最小电流参考值解锁模块化多电平直流融冰装置,将输出电流升至 0.5 倍额定值,保持 5 min~10 min,以施加电流指令值的方式使系统产生直流电流的阶跃(电流阶跃量宜选择 ± 0.3 p.u.)。

验证阶跃响应的响应时间和超调量是否满足设计要求,且无保护误动作,交流侧和直流侧有无异常的过电压和过电流。

4.2.2.1.10 额定电流试验

额定电流试验应根据现场环境温度对最大试验电流和试验时间进行修正。

通过闭合交流进线断路器对模块化多电平直流融冰装置带电,以最小电流参考值解锁模块化多电平直流融冰装置,将模块化多电平直流融冰装置输出电流逐步升至额定电流,运行 10 min,然后逐步降至最小电流,闭锁模块化多电平直流融冰装置。

试验过程中,验证设备运行状况是否正常,且模块化多电平直流融冰装置的以下数据满足设计要求:

- a) 输出直流电压、电流及功率;
- b) 输入交流电压和电流;
- c) 输入有功功率和无功功率;
- d) 输出直流电流的控制精度;
- e) 子模块电容电压;
- f) 损耗。

试验过程中,还应同时测量交流谐波。在模块化多电平直流融冰装置运行和退出状态,分别测量模块化多电平直流融冰装置接入点的谐波电流、谐波电压,验证接入点的谐波是否达到设计要求。

4.2.2.1.11 静止同步补偿功能试验

模块化多电平直流融冰装置在静止同步补偿模式下的静止同步补偿功能试验按照 DL/T 1215.4 的要求进行。

4.2.2.2 连续通电试验

控制保护装置在通过功能和性能试验后,应进行 72 h 连续通电试验。试验期间,融冰电流的设定值不应低于额定电流的 60%。

5 现场试验

5.1 设备试验

5.1.1 电网换相直流融冰装置

5.1.1.1 电网换相换流器

5.1.1.1.1 外观检查

检查内容应包括:

- a) 晶闸管阀整体外观；
- b) 机械连接和电气连接。

5.1.1.1.2 阀电子电路检查

检查内容应包括：

- a) 阀电子电路的电源(电流和电压)输入和输出；
- b) 失去电源时的报警信号。

5.1.1.1.3 光纤检查

检查内容应包括：

- a) 从阀基电子设备到阀电子电路(或相反方向)的每一根光纤的衰耗；
- b) 每根光纤连接；
- c) 阀电子电路单元接收的脉冲次序和开通脉冲的波形；
- d) 发送和接收的监视信号。

5.1.1.1.4 冷却回路检查

检查内容应包括：

- a) 所有路径中冷却回路；
- b) 检查冷却回路的连接；
- c) 泄漏检测和报警信号；
- d) 晶闸管阀安装完成后,对阀进行水压试验,检查阀水冷管路所有接口。

5.1.1.1.5 接触电阻测量

检查内容应包括：

- a) 弹簧的压紧力；
- b) 晶闸管与散热器之间的接触电阻；
- c) 晶闸管阀上的每个互连母线的接触电阻和母线连结螺栓的力矩值。

5.1.1.1.6 回路阻抗测量

测量每个阀的总电阻和电容的值。

5.1.1.1.7 低压触发试验(可选)

晶闸管级经负载接入低压交流回路,检查晶闸管及其触发、回报信号。

5.1.1.1.8 阀支架绝缘试验

按照 GB 50150 中支柱绝缘子的要求进行阀支架绝缘电阻测试;或进行阀支架对地交流耐压试验,试验电压应为型式试验值的 80%。

5.1.1.2 控制保护装置

5.1.1.2.1 电源检查

检查内容应包括：

- a) 电源输入电压及各电源指示；

- b) 工作电源失去时备用电源自动切换；
- c) 失去电源时的报警信号；
- d) 规定的最高和最低电压下的控制功能。

5.1.1.2.2 互感器接口试验

互感器接口试验应检验所有与电网换相直流融冰装置控制和保护功能相关互感器的变比、极性和相位。

5.1.1.2.3 阀触发和监测接口试验

阀触发和监测接口试验应检验控制系统通过阀基电子单元和阀电子电路对晶闸管进行触发和监测信号。

5.1.1.2.4 控制保护功能接口试验

控制保护功能接口试验应检验电网换相直流融冰装置控制保护功能相关输入、输出信号。

5.1.1.2.5 监控系统接口试验

监控系统接口试验应检验电网换相直流融冰装置开关量、模拟量、报警及事故信息能可靠传送到监控系统,从监控系统发出的控制命令正确传输到控制系统。

5.1.1.2.6 故障录波接口试验

故障录波接口试验应检验故障录波接口及功能。

5.1.1.2.7 其他通信接口试验

其他通信接口试验应检验电网换相直流融冰装置监控系统和变电站综合自动化系统的通信接口。

5.1.1.2.8 整定值检查

整定值检查内容包括：

- a) 控制保护装置中控制和保护功能整定值；
- b) 监视信号显示的控制保护功能整定值和报警信号值。

5.1.1.2.9 其他二次回路

其他二次回路现场试验按照 GB 50171 的要求进行。

5.1.2 模块化多电平直流融冰装置

5.1.2.1 模块化多电平换流器

5.1.2.1.1 模块化多电平换流器阀

5.1.2.1.1.1 外观检查

检查内容应包括：

- a) 模块化多电平换流器阀整体外观；
- b) 机械连接和电气连接。

5.1.2.1.1.2 阀功能试验

阀功能试验用于检查子模块的基本功能是否正常,应包括:

- 子模块内部电子电路工作;
- 向子模块内部的功率器件下达开通和关断指令;
- 向子模块旁路开关下达合闸指令;
- 子模块与阀基控制设备之间的通信。

5.1.2.1.1.3 光纤检查

检查内容应包括:

- a) 从阀基电子设备到阀电子电路(或相反方向)的每一根光纤的衰耗;
- b) 每根光纤连接;
- c) 阀电子电路单元接收的脉冲次序和开通脉冲的波形;
- d) 发送和接收的监视信号。

5.1.2.1.1.4 冷却回路检查

检查内容应包括:

- a) 所有路径中冷却回路;
- b) 检查冷却回路的连接;
- c) 泄漏检测和报警信号;
- d) 模块化多电平阀安装完成后,对阀进行水压试验,检查阀水冷管路所有接口。

5.1.2.1.1.5 阀支架绝缘试验

按照 GB 50150 中支柱绝缘子的要求进行阀支架绝缘电阻测试,或进行阀支架对地交流耐压试验,试验电压应为型式试验值的 80%。

5.1.2.1.2 桥臂电抗器

5.1.2.1.2.1 外观检查

检查内容应包括:

- a) 检查在运输和安装过程中可能发生的设备损坏;
- b) 检查线圈中无元件松动;
- c) 检查端部接线是否良好。

5.1.2.1.2.2 绕组电阻测量

按照 4.2.1.2.1 执行。

5.1.2.2 控制保护装置

5.1.2.2.1 电源检查

检查内容应包括:

- a) 电源输入电压及各电源指示;
- b) 工作电源失去时备用电源自动切换;
- c) 失去电源时的报警信号;

d) 规定的最高和最低电压下的控制功能。

5.1.2.2.2 互感器接口试验

互感器接口试验应检验所有与模块化多电平直流融冰装置控制和保护功能相关互感器的变比、极性和相位。

5.1.2.2.3 阀触发和监测接口试验

阀触发和监测接口试验应检验控制系统通过阀基电子单元和阀电子电路对子模块进行触发和监测信号。

5.1.2.2.4 控制保护功能接口试验

控制保护功能接口试验应检验模块化多电平直流融冰装置控制保护功能相关输入、输出信号。

5.1.2.2.5 监控系统接口试验

监控系统接口试验应检验模块化多电平直流融冰装置开关量、模拟量、报警及事故信息能可靠传送到监控系统,从监控系统发出的控制命令正确传输到控制系统。

5.1.2.2.6 故障录波接口试验

故障录波接口试验应检验故障录波接口及功能。

5.1.2.2.7 其他通信接口试验

其他通信接口试验应检验模块化多电平直流融冰装置监控系统和变电站综合自动化系统的通信接口。

5.1.2.2.8 整定值检查

整定值检查内容包括:

- a) 控制保护装置中控制和保护功能整定值与定值单一致;
- b) 监视信号正确显示控制保护功能整定值和报警信号值。

5.1.2.2.9 其他二次回路

其他二次回路现场试验按照 GB 50171 的要求进行。

5.2 分系统试验

5.2.1 概述



分系统试验内容主要包括:

- a) 检查控制保护装置的通信回路连接;
- b) 检查控制保护装置与监控系统及其他与之相连的设备之间的信号传输;
- c) 检查其他测控装置和继电保护装置的传动功能;
- d) 检查模块化多电平直流融冰装置的融冰顺序控制功能。

5.2.2 控制保护装置信号检查

模拟直流融冰装置各一次设备状态及信号,从各测点注入相应的电压、电流等电气量,通过监控系

统下发操作指令,检查控制保护相应的采集及监控信息。

5.2.3 控制保护装置传动试验

模拟直流侧或交流侧故障,检查直流融冰控制保护装置中的各种控制和保护功能动作情况,断路器动作情况和信号指示。

5.2.4 其他测控装置和继电保护装置信号检查

通过继电保护测试仪从保护采集的各测点注入相应的电压、电流等电气量,检查对应的测控装置和继电保护的采集及监视信息。

5.2.5 其他测控装置和继电保护装置保护传动试验

通过继电保护测试仪,从互感器的二次侧注入模拟故障量,检查换流变压器保护(适用时)、交流滤波器保护(适用时)、断路器保护等各种保护动作情况,断路器动作情况和信号指示。

5.2.6 融冰顺序控制试验

对于有融冰顺序控制功能的直流融冰装置进行融冰顺序控制试验,检查其自动控制功能动作情况,各接地开关、隔离开关和断路器动作时序和信号指示。

5.3 系统试验

5.3.1 通则

在直流融冰装置正式投入运行前、分系统试验完成并验收合格后,应进行系统试验,宜采用由开路试验和零功率试验组成的等效试验作为验收依据,可不开展带线路运行试验。

系统试验应制定符合工程文件要求的试验方案。带电试验应在不带电试验完成后进行,开路试验应在换流器带电试验和带电跳闸试验完成后进行,零功率试验应在开路试验完成后进行。

系统试验过程中,应对系统的稳态数据,以及系统动态和暂态过程中直流融冰装置的动态响应特性、过电压、谐波性能、噪声等进行跟踪监测。系统和设备的功能和性能指标均应满足直流融冰装置系统设计要求。

5.3.2 电网换相直流融冰装置

5.3.2.1 不带电系统试验

5.3.2.1.1 不带电顺序操作试验

电网换相直流融冰装置一次回路不带电,进行手动顺序操作、联锁功能和自动顺序操作。在监控系统人机界面上进行如下试验:

- a) 对电网换相直流融冰装置直流侧的隔离开关、接地开关进行单步操作,电网换相直流融冰装置在手动下的单步顺序操作及联锁功能;
- b) 对电网换相直流融冰装置进行自动顺序操作功能。

5.3.2.1.2 不带电跳闸试验

电网换相直流融冰装置一次回路不带电,验证控制保护装置跳闸的正确性。在下列情况下,控制保护装置应启动跳闸信号,断开交流侧断路器:

- a) 启动手动紧急停运功能;

- b) 模拟直流过电压故障；
- c) 模拟直流过电流故障；
- d) 模拟冷却系统故障；
- e) 模拟换流变压器故障。

5.3.2.2 交流滤波器带电试验

电网换相直流融冰装置配置交流滤波器时,应进行交流滤波器带电试验,检查交流滤波器等设备的冲击合闸耐受能力,检验交流滤波器回路的交流电压、交流电流测量值。

融冰线路不接入电网换相直流融冰装置,通过交流滤波器断路器对交流滤波器带电 3 次,每次间隔时间宜为 10 min~15 min,试验过程中观察交流滤波器带电情况,测量交流电压和电流幅值、相位和极性。

5.3.2.3 换流变压器带电试验

换流变压器带电试验验证换流变压器的冲击合闸耐受能力,检验交流电压、交流电流测量值。

断开换流器与换流变压器之间的电气连接,通过交流进线断路器对换流变压器带电 3 次~5 次,每次间隔时间为 5 min~10 min,试验过程中观察换流变压器带电情况,测量交流电压幅值、相位和极性。

5.3.2.4 换流器带电试验

换流器带电试验在换流变压器带电试验完成后进行,检查换流器的合闸冲击耐受能力,同时校验换流器同步电压、预检信号。

通过交流进线断路器对换流器带电 3 次,每次间隔时间为 5 min~10 min,试验过程中检查换流器与换流变压器之间的电气连接,观察换流器带电情况。

5.3.2.5 带电跳闸试验

带电跳闸试验在换流器带电试验完成后进行,在电网换相直流融冰装置交流侧带电的情况下,验证控制保护装置故障跳闸的正确性。

带电跳闸试验可参照不带电跳闸试验,检查控制保护、冷却系统、紧急停运等设备的跳闸信号传递及断路器动作情况。

5.3.2.6 开路试验

开路试验验证电网换相直流融冰装置的直流电压耐受能力、直流电压控制能力及直流电流运行范围,电网换相直流融冰装置在额定直流电压下运行是否正常以及输出直流电压与设计值是否符合。

开路试验应在换流器带电试验和带电跳闸试验完成后进行。

开路试验应在不带融冰线路的条件下进行,试验包括以下内容。

a) 手动模式开路试验

电网换相直流融冰装置交流侧带电,直流输出侧断开。手动设定开路试验的直流电压预定值(最大限制值为 1.05 倍额定值)和电压变化速率,手动启动直流电压升压程序将直流电压升至预定值。

试验过程中,监视输出直流电压变化情况。

在直流电压升降过程中,直流电压的升降可手动停止,而直流电压应保持在停止时刻的值,且能根据需继续升高或降低。任何情况下均可手动闭锁电网换相直流融冰装置。

试验结束后,手动降压,并闭锁电网换相直流融冰装置。

b) 自动模式开路试验

电网换相直流融冰装置交流侧带电,直流输出侧断开。启动预设的开路试验程序,程序全过程中自动执行以下操作:解锁电网换相直流融冰装置,将直流电压按一定变化速率升至预定值(最大限制值为1.05倍额定值),保持一段时间,然后将直流电压降至零,闭锁电网换相直流融冰装置。

直流电压预定值、电压变化速率和保持时间能预先设定。

试验过程中,监视输出直流电压变化情况。

在直流电压升降过程中,直流电压的升降可手动停止,而直流电压应保持在停止时刻的值,且能根据需要继续升高或降低。任何情况下均可手动闭锁电网换相直流融冰装置。

5.3.2.7 零功率试验

5.3.2.7.1 通则

零功率试验主要用于验证电网换相直流融冰装置直流电流控制功能及直流电流运行范围,换流器和直流侧隔离开关等设备的通流能力。

零功率试验应在开路试验完成后进行。

试验时,电网换相直流融冰装置与融冰母线断开,交流侧正常接线,直流侧平波电抗器线路侧通过隔离开关短接。

5.3.2.7.2 启停试验

在零功率模式下,合上电网换相直流融冰装置交流进线断路器使换流器带电,设定电流参考值为零功率最小允许电流值,解锁电网换相直流融冰装置。检查电网换相直流融冰装置启动逻辑,记录交流电流相位、极性和测量值以及直流电压、电流极性和测量值。

保持5 min~10 min后,发出电网换相直流融冰装置闭锁命令,正常停运电网换相直流融冰装置,监视交流侧和直流侧电气量变化情况。

5.3.2.7.3 手动紧急停运试验

在零功率模式下,以零功率最小允许电流值解锁电网换相直流融冰装置,保持5 min~10 min。

启动手动紧急停运功能。检查电网换相直流融冰装置紧急停运逻辑,监视交流侧和直流侧电气量变化情况。

5.3.2.7.4 冗余切换试验

冗余切换试验对具有冗余功能的电网换相直流融冰装置进行,验证控制保护装置和辅助电源等的冗余功能。冗余切换试验的对象通常包括:

- a) 控制保护装置;
- b) 辅助电源。

在零功率模式下,以零功率最小允许电流值解锁电网换相直流融冰装置,模拟电网换相直流融冰装置主控制保护装置和辅助电源故障,检查冗余切换功能,监视交流侧和直流侧电气量变化情况。

5.3.2.7.5 电流升降试验

在零功率模式下,以最小电流参考值解锁电网换相直流融冰装置,在电流允许范围内设定电网换相直流融冰装置输出电流,在达到每个设定电流后均保持5 min~10 min。

监视设备运行参数和温升,换流器交流侧电压和电流、直流侧电压和电流、触发角的变化情况。

5.3.2.7.6 电流阶跃试验

在零功率模式下,以最小电流参考值解锁电网换相直流融冰装置,将输出电流升至 0.5 倍额定值,保持 5 min~10 min,以施加电流指令值的方式使系统产生直流电流的阶跃(电流阶跃量宜选择 ± 0.3 p.u.)。

记录阶跃响应的响应时间和超调量,检查保护动作情况,监视交流侧和直流侧电气量变化情况。

5.3.2.7.7 额定电流试验

额定电流试验应根据现场环境温度对最大试验电流和试验时间进行修正。

在零功率模式下,以最小电流参考值解锁电网换相直流融冰装置,将电网换相直流融冰装置输出电流逐步升至额定电流,运行 0.5 h~2 h,然后逐步降至最小电流,闭锁电网换相直流融冰装置。

试验过程中,监视设备运行状况,记录电网换相直流融冰装置的以下数据:

- a) 输出直流电压、电流及功率;
- b) 输入交流电压和电流;
- c) 输入有功功率和无功功率;
- d) 输出直流电流的控制精度;
- e) 晶闸管阀触发延迟角;
- f) 损耗。

试验过程中,还应同时测量以下数据。

- 设备温升。电网换相直流融冰装置中的各电气设备、连接线及接头、变压器油等各典型测温点的温度。
- 可听噪声。电网换相直流融冰装置中换流变压器、换流器、冷却设备、交流滤波器等设备的噪声以及变电站厂界测量点的噪声。
- 交流谐波。电网换相直流融冰装置运行和退出状态电网换相直流融冰装置接入点的谐波电流、谐波电压和各滤波器支路的谐波电流。

5.3.2.8 带线路运行试验(选做)

现场具备条件时,可选择合适的线路接入电网换相直流融冰装置,进行带线路运行试验,验证电网换相直流融冰装置运行特性和直流电流输出能力。试验应根据现场环境条件对最大试验电流和试验时间进行修正。

根据具体情况选择融冰线路,将融冰线路接入电网换相直流融冰装置,通过逐步增大输出电流设定值的方法将其输出电流逐步提升至额定电流(可根据设备和现场情况逐步增加输出电流设定值,在达到每个电流设定值后均保持 5 min~10 min),运行 0.5 h~2 h,然后通过逐步减小输出电流设定值的方法将直流融冰装置输出电流降至最小电流,闭锁电网换相直流融冰装置。

如设计有融冰顺序控制功能,也应进行验证。

试验过程中,监视设备和线路运行状况,记录电网换相直流融冰装置的以下数据:

- a) 输出直流电压、电流及功率;
- b) 输入交流电压和电流;
- c) 输入有功功率和无功功率;
- d) 输出直流电流的控制精度;
- e) 晶闸管阀触发延迟角;
- f) 损耗。

试验过程中,宜同时测量并记录以下数据。

- 设备温升。融冰线路、电网换相直流融冰装置中的各电气设备、连接线及接头、变压器油等各典型测温点的温度。
- 可听噪声。电网换相直流融冰装置中换流变压器、换流器、冷却设备、交流滤波器等设备的噪声以及变电站厂界测量点的噪声。
- 交流谐波。在电网换相直流融冰装置运行和退出状态,电网换相直流融冰装置接入点的谐波电流、谐波电压和各滤波器支路的谐波电流。
- 感应电压和感应电流。电网换相直流融冰装置带线路运行,邻近其他运行设备和线路在直流融冰回路中的感应电压和电流。

5.3.2.9 静止无功补偿功能试验

电网换相直流融冰装置兼有静止无功补偿功能时,按照 GB/T 20297 的要求进行静止无功补偿功能试验。

5.3.3 模块化多电平直流融冰装置

5.3.3.1 不带电系统试验

5.3.3.1.1 不带电顺序操作试验

模块化多电平直流融冰装置一次回路不带电,验证手动顺序操作及联锁功能和自动顺序操作功能的正确性。在监控系统人机界面上进行如下试验:

- a) 对模块化多电平直流融冰装置直流侧的隔离开关、接地开关进行单步操作,检查模块化多电平直流融冰装置手动单步顺序操作及联锁功能;
- b) 对模块化多电平直流融冰装置进行自动顺序操作,检查模块化多电平直流融冰装置自动顺序操作功能。

5.3.3.1.2 不带电跳闸试验

模块化多电平直流融冰装置一次回路不带电,验证控制保护装置跳闸的正确性。在下列情况下,控制保护装置应启动跳闸信号,断开交流侧断路器:

- a) 启动手动紧急停运功能;
- b) 模拟直流过电压故障;
- c) 模拟直流过电流故障;
- d) 模拟冷却系统故障。

5.3.3.2 模块化多电平换流器带电试验

模块化多电平换流器带电试验验证换流器的合闸冲击耐受能力以及换流器带电功能正常。

融冰线路不接入模块化多电平直流融冰装置,确认换流器与交流系统之间电气连接正常。通过闭合交流进线断路器对换流器带电 3 次,每次间隔时间不少于 5 min,检查带电时子模块充电情况、阀控制保护装置工作情况。

试验中子模块不应损坏。如出现子模块故障报警信号,应暂停试验,确认不会导致换流器更严重故障后可继续试验。

5.3.3.3 带电跳闸试验

带电跳闸试验在换流器带电试验完成后进行,在模块化多电平直流融冰装置交流侧带电的情况下,验证控制保护装置故障跳闸的正确性。

带电跳闸试验可参照不带电跳闸试验,检查控制保护、冷却系统、紧急停运等设备的跳闸信号传递及断路器动作情况。

5.3.3.4 开路试验

开路试验验证模块化多电平直流融冰装置的直流电压耐受能力、直流电压控制能力及直流电流运行范围,模块化多电平直流融冰装置在额定直流电压下运行是否正常以及输出直流电压与设计值是否相符。

开路试验应在换流器带电试验和带电跳闸试验完成后进行。

开路试验应在不带融冰线路的条件下进行,试验包括以下内容。

a) 手动模式开路试验

模块化多电平直流融冰装置交流侧带电,直流侧断开。手动设定开路试验的直流电压预定值(最大限制值为 1.05 倍额定值)和电压变化速率,手动启动直流电压升压程序将直流电压升至预定值。

试验过程中,检查直流电压变化情况。

在直流电压升降过程中,直流电压的升降可手动停止,而直流电压应保持在停止时刻的值,且能根据需继续升高或降低。任何情况下均可手动闭锁模块化多电平直流融冰装置。

试验结束后,手动将直流电压降至零,并闭锁模块化多电平直流融冰装置。

b) 自动模式开路试验

模块化多电平直流融冰装置交流侧带电,直流输出侧断开。启动预设的开路试验程序,程序全过程中自动执行以下操作:解锁模块化多电平直流融冰装置,将直流电压按一定变化速率升至预定值(最大限制值为 1.05 倍额定值),保持一段时间,然后将直流电压降至零,闭锁模块化多电平直流融冰装置。

直流电压预定值、电压变化速率和保持时间能预先设定。

试验过程中,验证输出直流电压与设计值是否相符以及直流电压能够达到额定电压。

在直流电压升降过程中,直流电压的升降可手动停止,而直流电压应保持在停止时刻的值,且能根据需继续升高或降低。任何情况下均可手动闭锁模块化多电平直流融冰装置。

5.3.3.5 零功率试验

5.3.3.5.1 通则

零功率试验主要用于验证模块化多电平直流融冰装置直流电流控制功能及直流电流运行范围,换流器和直流侧隔离开关等设备的通流能力。

零功率试验应在换流器带电试验、带电跳闸试验和开路试验完成后进行。

试验时,将模块化多电平直流融冰装置与融冰母线断开,交流侧正常接线,直流侧通过融冰母线装置侧隔离开关短接。

5.3.3.5.2 启停试验

在零功率模式下,合上模块化多电平直流融冰装置交流进线断路器对换流器带电,设定电流参考值为零功率最小允许电流值,解锁模块化多电平直流融冰装置。检查模块化多电平直流融冰装置启动逻辑,记录交流电流相位、极性和测量值以及直流电压、电流极性和测量值。

保持 5 min~10 min 后,发出模块化多电平直流融冰装置闭锁命令,正常停运模块化多电平融冰装置,监视交流侧和直流侧电气量变化情况。

5.3.3.5.3 手动紧急停运试验

在零功率模式下,以零功率最小允许电流值解锁模块化多电平直流融冰装置,保持 5 min~10 min。

启动手动紧急停运功能。检查模块化多电平融冰装置紧急停运逻辑,监视交流侧和直流侧电气量变化情况。

5.3.3.5.4 冗余切换试验

冗余切换试验对具有冗余功能的模块化多电平直流融冰装置进行,验证控制保护装置和辅助电源等的冗余功能。冗余切换试验的对象通常包括:

- a) 控制保护装置;
- b) 辅助电源。

在零功率模式下,以零功率最小允许电流值解锁模块化多电平直流融冰装置,模拟模块化多电平直流融冰装置主控制保护装置和辅助电源故障,检查冗余切换功能,监视交流侧和直流侧电气量变化情况。

5.3.3.5.5 子模块冗余试验

子模块冗余试验验证换流器子模块冗余度是否满足设计要求。

在零功率模式下,以最小电流参考值解锁模块化多电平直流融冰装置,在换流器的任一阀上使子模块逐一旁路,直至子模块旁路个数多于阀内子模块冗余数。

当子模块旁路个数未超过阀内子模块冗余数时,监视模块化多电平直流融冰装置运行状态变化;超过阀内子模块冗余数后,检查模块化多电平直流融冰装置交流进线断路器状态。

5.3.3.5.6 电流升降试验

在零功率模式下,以最小电流参考值解锁模块化多电平直流融冰装置,在电流允许范围内设定模块化多电平直流融冰装置输出电流,在达到每个设定电流后均保持 5 min~10 min。

监视设备运行参数和温升,交流母线电压、阀侧电流、直流电压、直流电流和子模块电容电压的变化情况。

5.3.3.5.7 电流阶跃试验

在零功率模式下,以最小电流参考值解锁电网换相直流融冰装置,将输出电流升至 0.5 倍额定值,保持 5 min~10 min,以施加电流指令值的方式使系统产生直流电流的阶跃(电流阶跃量宜选择 ± 0.3 p.u.)。

检查阶跃响应的响应时间和超调量,检查保护动作情况,监视交流侧和直流侧电气量变化情况。

5.3.3.5.8 额定电流试验

试验应根据现场环境温度对最大试验电流和试验时间进行修正。

在零功率模式下,以最小电流参考值解锁模块化多电平直流融冰装置,将模块化多电平直流融冰装置输出电流逐步升至额定电流,运行 0.5 h~2 h,然后逐步降至最小电流,闭锁模块化多电平直流融冰装置。

试验过程中,监视设备运行状况,记录模块化多电平直流融冰装置以下数据:

- a) 输出直流电压、电流及功率;
- b) 输入交流电压和电流;

- c) 输入有功功率和无功功率；
- d) 输出直流电流的控制精度；
- e) 每个子模块的电容电压；
- f) 损耗。

试验过程中,还应同时测量以下数据。

- 设备温升。模块化多电平直流融冰装置中的各电气设备、连接线及接头等各典型测温点的温度。
- 可听噪声。模块化多电平直流融冰装置换流器、冷却设备、启动电阻器等设备的噪声以及变电站厂界测量点的噪声。
- 交流谐波。在模块化多电平直流融冰装置运行和退出状态,模块化多电平直流融冰装置接入点的谐波电流和谐波电压。

5.3.3.6 带线路运行试验(选做)

现场具备条件时,可选择合适的线路接入模块化多电平直流融冰装置,进行带线路运行试验,验证模块化多电平直流融冰装置运行特性和直流电流输出能力。试验应根据现场环境条件对最大试验电流和试验时间进行修正。

根据具体情况选择融冰线路,将融冰线路接入模块化多电平直流融冰装置,通过逐步增大输出电流设定值的方法将其输出电流逐步提升至额定电流(可根据设备和现场情况逐步增加输出电流设定值,在达到每个电流设定值后均保持 5 min~10 min),运行 0.5 h~2 h,然后通过逐步减小输出电流设定值的方法将直流融冰装置输出电流降至最小电流,闭锁模块化多电平直流融冰装置。

如设计有融冰顺序控制功能,也应进行验证。

试验过程中,监视设备和线路运行状况,且记录模块化多电平直流融冰装置的以下数据:

- a) 输出直流电压、电流及功率；
- b) 输入交流电压和电流；
- c) 输入有功功率和无功功率；
- d) 输出直流电流的控制精度；
- e) 每个子模块的电容电压；
- f) 损耗。

试验过程中,宜同时测量并记录以下数据。

- 设备温升。监视融冰线路、模块化多电平直流融冰装置中的各电气设备、连接线及接头等各典型测温点的温度。
- 可听噪声。模块化多电平直流融冰装置换流器、冷却设备、启动电阻器等设备的噪声以及变电站厂界测量点的噪声。
- 交流谐波。在模块化多电平直流融冰装置运行和退出状态,量模块化多电平直流融冰装置接入点的谐波电流和谐波电压。
- 感应电压和感应电流。模块化多电平直流融冰装置带线路运行,邻近其他运行设备和线路在直流融冰回路中的感应电压和电流。

5.3.3.7 静止同步补偿功能试验

模块化多电平直流融冰装置在静止同步补偿模式下的静止同步补偿功能试验按照 DL/T 1215.4 的要求进行。

6 维护试验

6.1 通则

直流融冰装置投运后,运行和维护按照 GB/T 31487.1—2025 第 8 章要求开展,每年冰期来临前应至少完成 1 次维护试验(至少包括开路试验和零功率试验),零功率试验在开路试验完成后进行,以此作为带线路运行的等效试验。

6.2 开路试验

电网换相直流融冰装置的开路试验按照 5.3.2.6 进行,在额定电压下的保持时间不少于 10 min。

模块化多电平直流融冰装置的开路试验按照 5.3.3.4 进行,在额定电压下的保持时间不少于 10 min。

6.3 零功率试验

电网换相直流融冰装置按照 5.3.2.7.2 完成启停试验,按照 5.3.2.7.5 完成电流升降试验,进行电流升降试验时的最大电流不应低于额定电流,且保持时间不少于 30 min。

模块化多电平直流融冰装置按照 5.3.3.5.2 完成启停试验,按照 5.3.3.5.6 完成电流升降试验,进行电流升降试验时的最大电流不应低于额定电流,且保持时间不少于 30 min。

6.4 带线路运行试验

现场具备条件时,可选择合适的线路接入直流融冰装置进行带线路运行试验。

电网换相直流融冰装置的带线路运行试验按照 5.3.2.8 进行,且保持时间不少于 30 min。

模块化多电平直流融冰装置的带线路运行试验按照 5.3.3.6 进行,且保持时间不少于 30 min。



