



中华人民共和国国家标准

GB/T 31487.2—2025

代替 GB/T 31487.2—2015

直流融冰装置 第2部分：换流器

Direct current deicers—Part 2: Converters

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 换流器的类型 3

 4.1 通则 3

 4.2 电网换相换流器 3

 4.3 模块化多电平换流器 3

5 技术要求 3

 5.1 正常使用条件 3

 5.2 负载 3

 5.3 总体性能要求 4

 5.4 电网换相换流器的性能 4

 5.5 模块化多电平换流器的性能 7

6 检验规则..... 10

 6.1 通则 10

 6.2 晶闸管阀的试验 10

 6.3 模块化多电平换流器阀的试验 12

 6.4 桥臂电抗器的试验 14

 6.5 水冷却设备试验 15

7 包装、运输和贮存 16

 7.1 包装 16

 7.2 运输 17

 7.3 贮存 17

附录 A（资料性） 直流融冰装置换流器拓扑 18

 A.1 6 脉动电网换相换流器 18

 A.2 12 脉动电网换相换流器 18

 A.3 电网换相换流器的晶闸管级 19

 A.4 模块化多电平换流器 19

 A.5 模块化多电平换流器的子模块 20

 A.6 其他类型直流融冰装置换流器拓扑 20

附录 B（资料性） 晶闸管阀的电气和冷却设计 23

B.1 晶闸管阀电气设计方法 23

B.2 晶闸管阀的电气设计示例 26

B.3 晶闸管阀冷却设计方法 28

B.4 晶闸管阀冷却设计示例 28

附录 C (资料性) 模块化多电平换流器阀的电气和冷却设计 30

C.1 模块化多电平换流器阀电气设计方法 30

C.2 模块化多电平换流器阀电气设计示例 32

C.3 模块化多电平换流器阀冷却设计方法 34

C.4 模块化多电平换流器阀冷却设计示例 35



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2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 31487.2—2015《直流融冰装置 第2部分：晶闸管阀》，与 GB/T 31487.2—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)；
- 更改了术语“阀”“晶闸管阀”“阀基电子设备”“大角度大电流运行”“额定直流电压”“额定直流电流”的定义(见3.1、3.2、3.6、3.8、3.10和3.11,2015年版的3.1、3.2、3.7、3.17、3.13和3.9)；
- 增加了术语“模块化多电平换流器阀”“理想空载直流电压”(见3.3和3.9)；
- 删除了术语“换流器”“单阀”“最大直流电流”“2 h 过载直流电流”“最大理想空载直流电压”“均流系数”“额定结温”“零功率试验”(见2015年版的3.3、3.4、3.10~3.12、3.15、3.16和3.18)；
- 增加了“换流器的类型”(见第4章)；
- 将“环境条件”更改为“正常使用条件”(见5.1,2015年版的4.1)；
- 删除了“接入系统”(见2015年版的4.2)；
- 更改了关于“负载”的规定(见5.2,2015年版的4.3)；
- 更改了“输出直流电压的要求”(见5.3.2,2015年版的4.4.3)；
- 删除了“输出电流的断续要求”“大角度大电流运行的要求”“工作于静止无功补偿模式的要求”(见2015年版的4.4.4~4.4.6)；
- 删除了“晶闸管阀的电气联结型式”“晶闸管阀的设计”(见2015年版的第5章和第6章)；
- 增加了“电网换相换流器的性能”“模块化多电平换流器的性能”(见5.4和5.5)；
- 将“试验”更改为“检验规则”(见第6章,2015年版的第7章)；
- 将“型式试验和例行试验”和“现场试验”更改为“晶闸管阀的试验”(见6.2,见2015年版的7.2和7.3)；
- 增加了“模块化多电平换流器阀的试验”“桥臂电抗器的试验”“水冷却设备试验”(见6.3~6.5)；
- 增加了“包装、运输和贮存”(见第7章)；
- 删除了“晶闸管阀的损耗计算方法”(见2015年版的附录A)。

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：贵州电网有限责任公司电力科学研究院、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、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、中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司、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、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、西安西电避雷器有限责任公司。

本文件主要起草人：周月宾、李欢、杨晓辉、毛先胤、傅闯、周会高、魏伟、许钊、王皆庆、蔚红旗、辛清明、雷鸣、徐迪臻、冯俊杰、李凌飞、侯婷、代书龙、曾华荣、黄超、陈煜坤、任孟干、邹常跃、赵晓斌、王泽昊、樊灵孟、李英、张娟娟、陈名、唐金昆、秦康、李浩、张强、奚鑫泽、陈怡静、李春华、李阳、洪权炜、董添华、田杰、李斌、许建中、何佳伟、何晋伟、刘涛、许树楷、方红伟、吴越、杨柳、熊岩、万启发、杨勇、李琦、王立平、杨友添、孟学磊、徐望圣、杨旗、班国邦、钟尧、张建平、廖名洋、王小岭、李彬彬、黄鑫、廖汉卿、刘湘、周陈韬、谢惠藩、李婧靓、邓文华、梁宁、李超、王志远、黄均纬、燕羣、彭向阳、林旭涛、雷鸣、马晓红、黄石华、饶斌斌、王秀环、刘隆晨、刘菲、彭光强、吴有、孙强、屈鲁、金涛、郭裕钧、张怿宁、朱大鹏、张宏涛、徐亚兵、何岩、关胜利、李明涛、姜庆飞。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

——2015年首次发布为 GB/T 31487.2—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2部分：换流器

1 范围

本文件规定了直流融冰装置换流器类型、技术要求、检验规则、包装、运输和贮存要求。

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 13384 机电产品包装通用技术条件
- GB/T 13498 高压直流输电术语
- GB/T 17702 电力电子电容器
- GB/T 20989 高压直流换流站损耗的确定
- 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 30425—2025 高压直流输电换流阀水冷却设备
- GB/T 31487.1 直流融冰装置 第1部分：系统设计
- GB/T 31487.3—2025 直流融冰装置 第3部分：试验
- GB/T 33348—2024 高压直流输电用电压源换流器阀 电气试验
- GB/T 34118 高压直流系统用电压源换流器术语
- GB/T 35702.1 高压直流系统用电压源换流器阀损耗 第1部分：一般要求
- GB/T 35702.2 高压直流系统用电压源换流器阀损耗 第2部分：模块化多电平换流器

3 术语和定义

GB/T 13498、GB/T 31487.1 和 GB/T 34118 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

阀 valve

由电力电子器件及辅助部件组成的电气和机械联合体，能实现单向或者双向导通，能实现换流臂功能。

注：直流融冰装置常用的阀有晶闸管阀和模块化多电平换流器阀等。

[来源：GB/T 31487.1—2025，3.2.1]

3.2

晶闸管阀 thyristor valve

采用晶闸管实现可控运行的完整组合的电子开关设备，正常情况下仅单向（正向）导电，在换流桥中，能实现换流臂功能。

[来源:GB/T 13498—2017,6.4,有修改]

3.3

模块化多电平换流器阀 modular multilevel converter valve

采用模块化多电平换流器标准组件组成的完整可控电压源装置,通常连接于一个交流端子和一个直流端子之间。

[来源:GB/T 34118—2017,7.8,有修改]

3.4

晶闸管级 thyristor level

晶闸管阀的部件,由一个晶闸管或若干并联的晶闸管与紧靠它们的辅助设备构成。

[来源:GB/T 13498—2017,6.9,有修改]

3.5

阀电子电路 valve electronics

在阀电位上执行控制、监测和保护功能的电子电路。

[来源:GB/T 13498—2017,6.16,有修改]

3.6

阀基电子设备 valve base electronics; VBE

处于地电位的电子设备,用于在直流融冰装置换流器控制系统和阀之间进行光电转换,为阀提供触发和监测功能。

[来源:GB/T 34118—2017,12.9,有修改]

3.7

触发[延迟]角 trigger (delay) angle

从理想的正弦换相电压正向过零点至正向电流导通开始时刻的时间,以电角度度量。

[来源:GB/T 13498—2017,7.20]

3.8

大角度大电流运行 large angle and high current operation

晶闸管阀通过额定电流且触发延迟角在 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 任意值的运行方式。

3.9

理想空载直流电压 ideal no-load DC voltage

U_{di0}

不考虑器件压降、换相电抗等负载作用和直流融冰装置换流器相位控制,仅与换相电压幅值相关的直流电压。

示例:单6脉动桥理想空载直流电压 U_{di0} 与交流侧电压 U_{v0} 的关系为 $U_{di0} = 1.35U_{v0}$ 。

[来源:GB/T 13498—2017,5.1.2,有修改]

3.10

额定直流电压 rated DC voltage

在规定条件下,直流融冰装置换流器能长期连续运行的直流电压值。

[来源:GB/T 13498—2017,5.1.3,有修改]

3.11

额定直流电流 rated DC current

在规定条件下,直流融冰装置换流器能长期连续运行的直流电流值。

[来源:GB/T 13498—2017,5.5,有修改]

3.12

额定直流功率 rated DC power

直流融冰装置换流器额定直流电压与额定直流电流之积。

4 换流器的类型

4.1 通则

按照直流融冰装置换流器(以下简称“换流器”)所采用的电力电子器件类型和工作原理分类,换流器可分为电网换相换流器、模块化多电平换流器及其他类型换流器。各类换流器的拓扑见附录 A。

4.2 电网换相换流器

电网换相换流器可分为 6 脉动换流器和 12 脉动换流器。电网换相换流器的电气联结型式宜为 12 脉动换流器。6 脉动换流器见图 A.1,12 脉动换流器见图 A.2。

电网换相换流器中的各个阀由多个晶闸管级(见图 A.3)串联构成。

4.3 模块化多电平换流器

模块化多电平换流器中的各个阀由多个全桥子模块串联构成(见图 A.4)。

5 技术要求

5.1 正常使用条件

5.1.1 温度

环境温度不低于 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$,不高于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5.1.2 相对湿度

环境温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的最高相对湿度不超过 90% 。

5.1.3 覆冰厚度

覆冰厚度不超过 20 mm 。

5.1.4 污秽

污秽等级为 d 级。

5.1.5 海拔

海拔不超过 $1\ 000\text{ m}$ 。当海拔超过 $1\ 000\text{ m}$ 时,应进行海拔修正。

5.1.6 风速

离地面高 10 m 处,维持 10 min 的平均最大风速不超过 34 m/s 。当超过该风速时,应在户外配电装置中采取措施,并对制造商提出针对风速的特殊要求。

5.1.7 日照强度

日照强度不超过 0.1 W/cm^2 。

5.2 负载

换流器的负载主要是不同型号和长度的架空导线、架空地线、光纤复合架空地线及其组合。

5.3 总体性能要求

5.3.1 输出直流电流

换流器输出的直流电流,在稳定运行时,允许选择从设计要求的最小值到最大值之间的任意电流值,输出直流电流的偏差应在目标设定值的 $\pm 5\%$ 以内。

5.3.2 输出直流电压

换流器输出的直流电压应满足系统设计要求,运行范围应为零至额定直流电压之间的任意电压值,具体由输出直流电流和直流侧负载共同确定。

5.4 电网换相换流器的性能

5.4.1 通则

电网换相换流器整体应满足 GB/T 31487.1 的系统设计要求,除保证直流融冰的正常运行需求外,还应保证电网换相换流器能承受由于设备故障或系统故障等所产生的电气应力。

电网换相换流器设计至少应包括以下基本技术要求:

- 晶闸管阀组成元件的类型和数目,包括晶闸管、阻尼回路等;
- 晶闸管阀的绝缘水平,包括直流耐压水平、交流耐压水平、操作冲击耐受电压水平和雷电冲击耐受电压水平等;
- 晶闸管阀的过电压保护类型,包括电压转折保护、反向恢复期过电压保护和操作过电压保护等;
- 晶闸管阀的电流应力,包括额定电流、过载电流和故障电流等;
- 冷却的型式和相关技术参数。

5.4.2 晶闸管阀

5.4.2.1 基本参数

晶闸管阀的主要参数包括:

- 额定直流电压;
- 额定直流电流;
- 额定直流功率;
- 冗余度;
- 过载能力;
- 绝缘水平。

5.4.2.2 电气性能

5.4.2.2.1 电压耐受能力

应在假定所有冗余晶闸管级都损坏的情况下,确定晶闸管阀的电压裕度。晶闸管阀应具有足够的交直流电压、操作冲击和雷电冲击电压等的耐受能力。

5.4.2.2.2 电流耐受能力

晶闸管阀的稳态电流能力应满足直流融冰装置额定输出电流和 1.1 倍过载 2 h 运行的要求,且应具备大角度大电流方式下的持续运行能力,在输出直流电流达到额定电流、触发角接近 90° 的工况下,

连续运行时间应大于 2 h。

晶闸管阀应具有耐受所有故障情况下流过其最大短路电流的能力。

5.4.2.2.3 冗余度

晶闸管阀应有一定的冗余,保证阀在部分器件故障或损坏的情况下,仍具有正常的运行能力。冗余度为晶闸管阀中冗余的晶闸管级数与晶闸管总级数的百分比。晶闸管阀冗余度不应小于 10%,且每个阀中冗余的晶闸管级数不少于 1 级。

5.4.2.2.4 损耗

晶闸管阀的损耗计算工况为在零功率工况额定电流运行。晶闸管阀各部分的损耗按照 GB/T 20989 的规定计算。

晶闸管阀的电气设计方法见附录 B 中 B.1。

5.4.2.3 主要部件

5.4.2.3.1 晶闸管

晶闸管的稳态电流应满足晶闸管阀额定电流和 1.1 倍过载 2 h 运行要求,浪涌电流应满足所有故障情况下流过晶闸管的最大短路电流要求。

5.4.2.3.2 阻尼回路

阻尼回路为电阻器和电容器串联,并联在晶闸管两端。

电阻器的电阻值和电容器的电容值应由晶闸管阀大角度大电流运行方式和阻尼回路的损耗功率确定。

5.4.2.3.3 阀电子电路

阀电子电路应满足晶闸管阀的功能、性能和可靠性的整体要求。除具有正常的晶闸管触发和状态回报功能外,阀电子电路还应具有如下保护功能。

- 晶闸管正向保护触发。当施加的正向电压超过允许的水平时,保护触发将晶闸管级触发导通,以避免晶闸管级损坏。晶闸管级保护触发可连续动作。
- 晶闸管恢复期保护。确保不因恢复期电压变化率(du/dt)上升或正向电压超过允许值造成晶闸管级损坏。

5.4.2.3.4 阀基电子设备

阀基电子设备用于触发和监测晶闸管阀,应具有完善的自检功能。阀基电子设备故障不应造成晶闸管阀损坏,应至少具备以下监视和保护功能。

- 对晶闸管级进行监视,以便确认每一晶闸管级的状态,并指示晶闸管级损坏的位置。
- 在晶闸管阀中任一晶闸管级损坏时,发出报警信号。如果晶闸管级损坏数超过冗余数,向监控系统或其他保护系统发出跳闸信号。



5.4.2.4 机械性能及结构布置

晶闸管阀的机械结构设计应遵循的基本原则如下:

- 运行稳定,抗电磁力和机械振动能力强;
- 电路、冷却回路和触发光路布置合理,运行可靠性高;

- 便于现场安装和巡视；
- 更换主要部件时，不必断开冷却回路等，便于维护；
- 电连接和冷却回路连接最短，以保证电网换相换流器整体牢固和可靠。

晶闸管阀的机械结构应满足在一根支撑绝缘子损坏的情况下，剩余支撑绝缘子能承受晶闸管阀的整体重量。剩余支撑应有承重冗余，该冗余度应超过整体极限机械强度的 50%。

晶闸管阀的施力构架宜采用绝缘拉杆、绝缘板或绝缘拉带等受力型绝缘件。在晶闸管阀安装过程中，对晶闸管的施力应直接或间接地定量进行。施力构架应具备一定的受力缓冲，确保晶闸管阀在规定的运行条件下，所有晶闸管均工作在合适的受力范围内。

晶闸管阀冷却回路的设计应避免阀在运行期间出现冷却液泄漏或堵塞。如果阀冷却回路发生了少量冷却液泄漏，晶闸管阀应具备继续运行能力。对于与冷却液直接接触的材料，其表面耐受电腐蚀和老化的能力应足够高，以确保不影响晶闸管阀的整体设计寿命。

光纤布置应便于光纤通道内所有部件的更换，同时应避免光纤本身承受自然重力造成过度拉伸。晶闸管阀上每种型号的光纤均应有足够的备用。

晶闸管阀主要部件的布置应满足以下条件：

- 满足安装、巡视和维护的要求；
 - 电路、冷却回路和触发光路宜分开布置，光缆和冷却管路宜分开布置；
 - 阀电子电路宜靠近晶闸管安装；
 - 当晶闸管阀水平布置时，阀中冷却回路的管路，宜布置在晶闸管阀散热器的上方或高于阀散热器，但不宜放在装有阀电子电路的一侧；
 - 晶闸管阀的整体布置方便主回路接线，方便其他相关测试、保护及控制设备或部件的连接和维护；
 - 对直流融冰兼静止无功补偿功能的晶闸管阀，整体布置对这两种模式的相互转换进行考虑。
- 采用地面支撑的晶闸管阀，在需要运输和移动时，宜采用侧面加装支撑的特殊结构。

5.4.2.5 防火

晶闸管阀的防火设计应满足以下条件：

- 晶闸管阀内使用的所有非金属材料都是阻燃性的，至少具有自熄灭性能；
- 晶闸管阀中所有电子元件运行时，应避免超过其所能承受的电应力和热应力；
- 宜减少晶闸管阀中的电连接点数量，电连接点采用螺栓或其他更可靠的方式紧固；
- 晶闸管阀中采用无油元件；
- 减小绝缘部分的电势差，应避免在污染和潮湿环境下产生较大的泄漏电流；
- 光缆导槽内部宜喷涂半导体漆，改善光缆沿途的电位分布。必要时，可设置等电位电极点。

5.4.2.6 防水

晶闸管阀的设计应满足防水要求。除了在布置上考虑防水外，还应在可能的流水处设置适当的断水点，以避免因水流贯穿导致阀绝缘破坏。

晶闸管阀宜装设相应的漏水监测和报警装置，在晶闸管阀出现较大的泄漏时，发出报警信号。

5.4.2.7 冷却

晶闸管阀的冷却配置应确保晶闸管阀在任何可能的工况下，晶闸管的结温不超过其规定值。

晶闸管阀宜采用水冷却。水冷却的参数按晶闸管阀的技术要求提出，一般包括冷却容量、内冷却液的电导率、流量、进水温度、出水温度、晶闸管阀单元冷却液最大压降、要求的报警和跳闸信号等。

晶闸管阀的冷却设计方法见 B.3。

5.5 模块化多电平换流器的性能

5.5.1 通则

模块化多电平换流器整体应满足 GB/T 31487.1 的设计要求,应具备直流融冰和静止同步补偿两种运行模式。除保证直流融冰和静止同步补偿的正常运行需求外,还应保证模块化多电平换流器能承受由于设备故障或系统故障等所产生的电气应力。

模块化多电平换流器设计包括(但不限于)以下基本技术要求:

- 模块化多电平换流器阀的阀塔类型、阀的主要部件的类型和数量、阀的电压耐受能力、阀的交流耐受能力、阀的可靠性、阀的机械性能和防火防爆性能;
- 阀冷却的型式和相关技术参数;
- 桥臂电抗器的型式和相关技术参数。

5.5.2 模块化多电平换流器阀

5.5.2.1 基本参数

模块化多电平换流器阀的主要参数包括:

- 额定直流电压;
- 额定直流电流;
- 额定直流功率;
- 直流融冰模式和静止同步补偿模式下交流侧额定无功补偿容量;
- 额定交流电压;
- 额定交流电流;
- 额定阀电流;
- 冗余度;
- 过载能力;
- 绝缘水平。

5.5.2.2 电气性能

5.5.2.2.1 电压耐受能力

应在假定所有冗余子模块都损坏的情况下,确定模块化多电平换流器阀的绝缘裕度。阀和阀支架应具有足够的交流电压、直流电压、操作冲击电压和雷电冲击电压等的耐受能力。

阀内各点的绝缘安全因数应符合:

- 对于操作冲击电压,至少超过避雷器保护水平或者最高过电压的 15%;
- 对于雷电冲击电压,至少超过避雷器保护水平或者最高过电压的 15%。

5.5.2.2.2 电流耐受能力

模块化多电平换流器阀的稳态电流能力应满足直流融冰装置额定电流和 1.1 倍过载 2 h 运行要求。暂态电流耐受能力的确定宜充分考虑接入交流系统故障、阀区故障和直流侧故障等。

5.5.2.2.3 冗余度

模块化多电平换流器阀应有一定的冗余度,保证阀在部分子模块故障或损坏情况下,仍具有正常的

运行能力。冗余度为模块化多电平换流器阀中冗余子模块数量与总子模块数量的百分比。模块化多电平换流器阀冗余度不应小于 10%，且每个阀中冗余子模块数量不少于 1 个。

5.5.2.2.4 损耗

模块化多电平换流器阀的损耗计算工况为在额定直流电压和额定直流电流下运行。阀的各部分损耗计算按 GB/T 35702.1 和 GB/T 35702.2 的规定进行。

模块化多电平换流器阀的电气设计方法见附录 C 中 C.1。

5.5.2.3 主要部件

5.5.2.3.1 功率器件

选择功率器件时，考虑的主要因素有额定直流工作电压、额定工作电流、最高结温、封装形式等。

功率器件选型时可采用单只大电流器件，也可采用多只器件并联方式。

5.5.2.3.2 直流电容器

直流电容器应采用电力电子电容器，其技术性能应满足 GB/T 17702 的要求。

直流电容器的电容值应满足模块化多电平换流器阀的子模块电压波动要求。电容值的确定应满足换流器零功率试验工况的纹波限值不超过 $\pm 10\%$ 。电容器的额定工作电压应高于 1.1 倍的子模块的额定工作电压。电容器的额定工作电流应根据工程需求确定并留一定裕度。

直流电容器选型应采用无油化设计的产品。

5.5.2.3.3 放电电阻器

放电电阻器的选择应满足模块化多电平换流器阀子模块静态均压(即在不依赖于控制系统情况下，阀的自然均压能力)、放电时间及运行损耗要求。

静态均压指在不依赖于控制系统情况下，阀的自然均压能力。

放电时间一般取 4 倍~5 倍放电时间常数。放电结束时，阀的直流电容器残压应小于安全操作电压。

运行损耗计算时应满足子模块直流电压波动的要求，可取 1.1 倍子模块额定直流运行电压。

5.5.2.3.4 取能电源

取能电源宜充分考虑正常工作的输入电压范围，应满足最低启动电压、最高耐受电压要求，还应满足局部放电、温升、绝缘、抗电磁干扰能力等要求。

5.5.2.3.5 旁路开关

旁路开关应具备重复使用能力。

旁路开关应保持长期可靠稳定旁路，并能承受各种故障引起的过电压和过电流。旁路开关的合闸时间应按照系统保护要求确定(一般不大于 5 ms)。

5.5.2.3.6 子模块控制保护电路

模块化多电平换流器子模块控制保护电路应满足以下要求：

- 在一次系统正常或故障条件下，正确触发功率器件；
- 如果故障导致取能电源供电不足，在子模块控制保护电路不能正常工作之前，具有相应的保护

措施避免阀的损坏或出现不受控的情况；

- 任何故障不影响子模块控制保护电路按照控制指令动作；
- 模块化多电平换流器阀的触发系统采用光电转换接口。

5.5.2.4 机械性能及结构布置

模块化多电平换流器阀的机械性能应满足以下方面：

- 运行稳定,抗电磁力和机械振动能力强；
- 电路、冷却回路和触发光路布置合理,运行可靠性高,便于安装、巡视、检修和更换；
- 更换主要部件时,不必断开冷却回路等,便于维护；
- 各种金属构件耐腐蚀,以保证阀的设计寿命；
- 各种非金属构件耐电弧,避免因放电而导致快速老化；
- 遵循最短电连接和冷却回路连接的原则,以保证模块化多电平换流器整体牢固和可靠。

模块化多电平换流器阀的机械结构应满足在一根支撑绝缘子损坏的情况下,剩余支撑绝缘子能承受阀的整体重量。剩余支撑应有承重冗余,该冗余度应超过整体极限机械强度的 50%。

模块化多电平换流器阀冷却回路的设计应避免阀在运行期间出现冷却液泄漏或堵塞。如果发生少量冷却液泄漏,模块化多电平换流器阀应继续运行的能力。对于与冷却液直接接触的材料,其表面耐受电腐蚀和老化的能力应足够高,以确保不影响模块化多电平换流器阀的整体设计寿命。

模块化多电平换流器阀的光纤布置应便于光纤通道内所有部件的更换,同时避免光纤本身承受自然重力造成过度拉伸,阀上每种型号的光纤均应有足够的备用。

模块化多电平换流器阀主要部件的布置,应满足以下条件：

- 安装、巡视和维护的要求；
- 电路、冷却回路和触发光路尽量分开布置,光缆和冷却管路宜分开布置；
- 整体布置方便主回路接线,方便其他相关测试、保护及控制设备或部件的连接和维护。

5.5.2.5 防火防爆性能

模块化多电平换流器阀的防火防爆设计满足以下要求：

- 阀内的非金属材料宜是阻燃的,并具有自熄灭性能；
- 应避免电子元件超过其耐受的热应力；
- 减少电接触点的数量；
- 采用无油元件；
- 减小绝缘部分的电势差,避免在污染和潮湿环境下产生较大的泄漏电流；
- 子模块发生故障时快速旁路。

5.5.2.6 防水

模块化多电平换流器的防水应满足 5.4.2.6 中的要求。

5.5.2.7 冷却

模块化多电平换流器阀的散热器配置应确保功率器件在任何可能的工况下,结温不超过其规定值。

模块化多电平换流器阀宜采用水冷却。水冷却的参数按模块化多电平换流器阀的技术要求提出,一般包括散热功率、内冷却液的电导率、流量、进水温度、出水温度、阀单元冷却液最大压降、要求的报警和跳闸信号等。

模块化多电平换流器阀的冷却设计方法见 C.3。

5.5.3 桥臂电抗器

模块化多电平换流器桥臂电抗器宜布置在模块化多电平换流器阀的交流侧。

稳态运行情况下,桥臂电抗器应承受对地工频电压分量和相应的直流电压偏置分量以及直流电流分量和工频电流分量。在启动过程或其他暂态过程中,应承受可能出现的过电压。

稳态运行情况下,桥臂电抗器应承受直流电流分量和工频电流分量。考虑到换流器控制系统环流抑制功能的投退,还应承受必要的两倍工频电流分量。

6 检验规则

6.1 通则



换流器的检验分为型式试验、例行试验和现场试验。有下列情况之一时,应进行型式试验:

- 新产品的试制、定型、鉴定;
- 正式生产的产品在结构、材料、工艺、生产设备和管理等方面有较大改变,可能影响产品性能时;
- 例行试验结果与上次型式试验结果有较大差异时;
- 产品长期停产后恢复生产时。

为工程制造的所有阀或其部件都应经过产品的例行试验。试验应在阀、阀段或阀级上进行,视设计和试验条件而定。

6.2 晶闸管阀的试验

6.2.1 型式试验

晶闸管阀的型式试验和例行试验的试验顺序、大气校正因数的确定、冗余的处理等应符合 GB/T 20990.1—2020 中的相关规定。

型式试验中,试品晶闸管级的数量为一个阀中晶闸管级的数量。

型式试验项目和试验方法按照表 1 执行。

表 1 晶闸管阀的型式试验项目和试验方法

序号	试验项目		试验方法
1	绝缘试验	阀支架直流电压试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.1 进行
2		阀支架交流电压试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.2 进行
3		阀支架雷电冲击试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.3 进行
4		多重阀单元直流电压试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.4 进行
5		多重阀单元交流电压试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.5 进行
6		多重阀单元雷电冲击试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.6 进行
7		阀直流电压试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.7 进行
8		阀交流电压试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.8 进行
9		阀操作冲击试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.9 进行
10	运行试验	最大持续运行负载试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.10 进行
11		最小触发角试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.11 进行

表 1 晶闸管阀的型式试验项目和试验方法（续）

序号	试验项目		试验方法
12	运行试验	暂态欠电压试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.12 进行
13		断续直流电流试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.13 进行
14		大角度大电流运行能力试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.14 进行
15	阀抗电磁干扰试验		按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.15 进行

型式试验时,有少量晶闸管级发生故障是允许的,前提是这种故障极少,且没有表明任何典型的设计缺陷。型式试验中允许的短路晶闸管级的最大数目和允许的出现故障但未导致晶闸管级短路的晶闸管级的最大数目如表 2 所示。

表 2 型式试验期间允许的故障晶闸管级数量

任一项型式试验中,允许的 短路晶闸管级数	全部型式试验中,允许的短路 晶闸管级总数	全部型式试验中,出现故障但未导致 短路的晶闸管级追加数
1	1	1

全部型式试验结束时,短路的和出现其他故障的晶闸管级的分布应是随机的,不呈现任何可能表明设计不当的规律。与阀中多于一个晶闸管级关联的公共电气设备不应击穿或外部闪络,构成阀结构的绝缘材料以及冷却水管、光纤或脉冲传输和分配系统其他绝缘件不应有破坏性放电。任何时候,部件和导体表面温度,相关的载流节点和联接件的温度,以及相邻安装表面温度均应保持在设计允许的范围内。

型式试验结果应满足 5.4.2 的要求。

6.2.2 例行试验

例行试验包括阀各组装部件的试验,这些部件包括阀、阀级或它们的保护、控制和监测辅助电路部分。例行试验不包括阀、阀支架或阀结构中使用的独立部件的试验。例行试验项目和试验方法按照表 3 执行。

表 3 晶闸管阀例行试验项目和试验方法

序号	试验项目	试验方法
1	外观检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.16 进行
2	接线检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.17 进行
3	均压电路检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.18 进行
4	耐受电压检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.19 进行
5	局部放电检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.20 进行
6	辅助设备检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.21 进行
7	触发检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.22 进行
8	压力检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.1.23 进行

试验结果应表明晶闸管阀的组部件连接完好,基本功能正常,试验结果符合 5.4.2 的要求。

6.2.3 现场试验

现场试验项目和试验方法按照表 4 执行。

表 4 晶闸管阀的现场试验项目和试验方法

序号	试验项目	试验方法
1	外观检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.1.1 进行
2	阀电子电路检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.1.2 进行
3	光纤检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.1.3 进行
4	冷却回路检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.1.4 进行
5	接触电阻测量	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.1.5 进行
6	回路阻抗测量	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.1.6 进行
7	低压触发试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.1.7 进行
8	阀支架绝缘试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.1.8 进行

试验结果应表明晶闸管阀的组部件连接完好,基本功能正常,试验结果应符合 5.4.2 的要求。

电网换相换流器的运行试验应结合直流融冰装置系统试验进行,应满足 5.3 和 5.4 的要求。

6.3 模块化多电平换流器阀的试验

6.3.1 型式试验

模块化多电平换流器阀的型式试验和例行试验的试验顺序、大气校正因数的确定和冗余处理等应符合 GB/T 33348—2024 中的相关规定。

型式试验中,试品子模块数量宜为一个阀中子模块的数量或一个阀段中子模块数量。

型式试验项目和试验方法按照表 5 执行。

表 5 模块化多电平换流器阀的型式试验项目和试验方法

序号	试验项目		试验方法
1	绝缘试验	阀支架直流电压试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.1 进行
2		阀支架交流电压试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.2 进行
3		阀支架雷电冲击试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.3 进行
4		多重阀单元对地直流电压试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.4 进行
5		多重阀单元对地交流电压试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.5 进行
6		多重阀单元雷电冲击试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.6 进行
7		阀交流-直流电压试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.7 进行
8		阀操作冲击试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.8 进行
9	运行试验	最大连续运行负荷试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.9 进行
10		最大暂态过负荷运行试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.10 进行
11		最低直流电压试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.11 进行
12		功率器件过电流关断试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.12 进行
13		子模块旁路试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.13 进行
14	阀抗电磁干扰试验		按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.14 进行

型式试验的验收准则允许型式试验时有少量的子模块故障旁路,前提是这种故障极少,且没有表明任何典型的设计缺陷。型式试验中允许的故障子模块的最大数目如表 6 所示。

表 6 型式试验期间允许的故障子模块数量

在任一单项型式试验中允许出现的 短路或开路子模块数量	在全部型式试验中允许出现的 短路或开路子模块数量	在全部型式试验中其他的未导致 短路或开路的故障子模块数量
1	1	1

全部型式试验完成后,短路或开路的阀级和其他故障阀级分布基本上应是随机的,不呈现任何表明阀存在设计缺陷的规律。阀的多个阀级互联的公共电气设备不应出现击穿或外部闪络,或者构成阀结构的绝缘材料部分、冷却水管、光纤或脉冲传输及分配系统不应出现破坏性放电。部件和导体连同相应载流结点和联接件的表面温度,以及相邻接触体表面的温度在任何时候均应保持在设计允许的限值。

型式试验结果应满足 5.5.2 的要求。

6.3.2 例行试验

例行试验包括组装部件的试验,这些部件包括阀、阀段、阀级或它们的保护、控制和监测辅助电路部分。例行试验不包括阀、阀支架或阀结构中使用的独立部件的试验。

例行试验项目和试验方法按照表 7 执行。

表 7 模块化多电平换流器阀的例行试验项目和试验方法

序号	试验项目	试验方法
1	外观检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.15 进行
2	接线检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.16 进行
3	均压电路检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.17 进行
4	控制、保护和监测回路检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.18 进行
5	耐受电压检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.19 进行
6	局部放电检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.20 进行
7	开通/关断检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.21 进行
8	压力检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.1.22 进行

试验结果应表明模块化多电平换流器的组部件连接完好,基本功能正常,试验结果应符合 5.5.2 的要求。

6.3.3 现场试验

现场试验项目和试验方法按照表 8 执行。

表 8 模块化多电平换流器阀的现场试验项目和试验方法

序号	试验项目	试验方法
1	外观检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.1.1.1 进行
2	阀功能检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.1.1.2 进行

表 8 模块化多电平换流器阀的现场试验项目和试验方法（续）

序号	试验项目	试验方法
3	光纤检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.1.1.3 进行
4	冷却回路检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.1.1.4 进行
5	阀支架绝缘试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.1.1.5 进行

试验结果应表明模块化多电平换流器阀的组部件连接完好，基本功能正常，试验结果应符合 5.5.2 的要求。

模块化多电平换流器阀的运行试验应结合直流融冰装置系统试验进行，应满足 5.3 和 5.5 的要求。

6.4 桥臂电抗器的试验

6.4.1 型式试验和例行试验

桥臂电抗器的型式试验和例行试验项目和试验方法按照表 9 执行。

表 9 桥臂电抗器的型式试验和例行试验项目和试验方法

序号	试验项目	试验类别		试验方法
		型式试验	例行试验	
1	绕组电阻测量	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.2.1 进行
2	谐波电流损耗测量	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.2.2 进行
3	电感测量	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.2.3 进行
4	端对端雷电冲击试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.2.4 进行
5	直流负载试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.2.6 进行
6	外施交流电压耐受试验	√	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.2.7 进行
7	端对地雷电冲击试验	√	—	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.2.5 进行
8	端对地操作冲击试验	√	—	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.2.8 进行
9	直流温升试验	√	—	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.2.9 进行
10	交流温升试验	√	—	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.1.2.10 进行
注：“√”表示开展，“—”表示不开展。				

型式试验应在每种型式的桥臂电抗器中的一台上进行，但不必按表 9 中给出的顺序。

外施交流电压耐受试验期间，绝缘应无击穿和闪络现象发生。

端对地雷电冲击试验后，应无烟雾、异常声响出现，绝缘表面应无沿面闪络现象发生。

端对地操作冲击试验后，不应出现两次以上的沿面闪络现象。

直流温升试验和交流温升试验的结果应符合表 10 和表 11 的限值规定要求。

表 10 桥臂电抗器绕组温升限值

绝缘耐热等级	额定运行工况下		过载电流下
	平均温升限值 K	热点温升限值 K	热点温升限值 K
匝间绝缘和股间绝缘均不低于 180 ℃ (H 级)。线圈其他绝缘材料不低于 155 ℃ (F 级)	70	90	105
匝间绝缘不低于 180 ℃ (H 级), 股间绝缘不低于 130 ℃ (B 级)。线圈其他绝缘材料不低于 155 ℃ (F 级)	50	70	80

表 11 桥臂电抗器的金属结构件及端子温升限值

材料		温升限值 K
金属结构件		100
端子板材质种类	裸铜或裸铝	50
	接触面镀锡	65
	接触面镀银或镀镍	75
注：端子板温升考核位置为与连接金具相搭接的位置, 其余按照金属结构件考核温升。		

例行试验应在所有的桥臂电抗器上进行, 但可不按表 9 中给出的顺序。

直流损耗的偏差不应超过其规定值的 +2.5%, 谐波损耗的偏差不应超过其规定值的 +15%, 电抗器在任何频率下的电感对额定值的偏差应不超出 ±5% 的范围。

端对端雷电冲击试验后, 试品内部不应出现烟雾、异常声响, 试品绝缘表面应无沿面闪络现象发生。

直流负载试验期间, 试品应不出现烟雾、异常放电声响。

外施交流电压耐受试验期间, 绝缘应无击穿和闪络现象发生。

6.4.2 现场试验

桥臂电抗器的现场试验项目和试验方法应按照表 12 执行。

表 12 桥臂电抗器的现场试验项目和试验方法

序号	试验项目	试验方法
1	外观检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.1.2.1 进行
2	绕组电阻测量	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.1.2.2 进行

现场试验结果应表明桥臂电抗器的连接完好, 电阻测量值符合设计要求, 偏差符合 GB/T 1094.1—2013 的要求。

6.5 水冷却设备试验

6.5.1 型式试验和例行试验项

水冷设备的型式试验和例行试验项目和试验方法应按照表 13 执行。



表 13 水冷却设备的型式试验和例行试验项目和试验方法

序号	试验项目	试验类别		试验方法和验收准则
		型式试验	例行试验	
1	外观检查	√	√	按照 GB/T 30425—2025 的 7.2.1 进行
2	绝缘试验	√	√	按照 GB/T 30425—2025 的 7.2.2 进行
3	接地电阻测量	√	√	按照 GB/T 30425—2025 的 7.2.3 进行
4	压力试验	√	√	按照 GB/T 30425—2025 的 7.2.4 进行
5	水质测量	√	√	按照 GB/T 30425—2025 的 7.2.5 进行
6	水力性能试验	√	√	按照 GB/T 30425—2025 的 7.2.6 进行
7	换热性能试验	√	—	按照 GB/T 30425—2025 的 7.2.7 进行
8	噪声测量	√	—	按照 GB/T 30425—2025 的 7.2.8 进行
9	控制保护功能试验	√	√	按照 GB/T 30425—2025 的 7.2.9 进行
10	电磁兼容试验	√	—	按照 GB/T 30425—2025 的 7.2.10 进行
11	通信和接口试验	—	√	按照 GB/T 30425—2025 的 7.3.2 进行
12	连续运行试验	√	√	按照 GB/T 30425—2025 的 7.2.11 和 7.3.3 进行
注：“√”表示开展，“—”表示不开展。				

电网换相直流融冰装置水冷设备试验结果应满足 5.4.2.7 的要求,模块化多电平直流融冰装置水冷设备试验结果应满足 5.5.2.7 的要求。

6.5.2 现场试验

水冷设备的现场试验项目和试验方法应按照表 14 执行。

表 14 水冷却设备的现场试验项目和试验方法

序号	试验项目	试验方法和验收准则
1	外观检查	按照 GB/T 30425—2025 的 7.4.2 进行
2	压力试验	按照 GB/T 30425—2025 的 7.4.3 进行
3	通信和接口试验	按照 GB/T 30425—2025 的 7.4.4 进行
4	连续运行试验	按照 GB/T 30425—2025 的 7.4.5 进行
5	整体性能试验	按照 GB/T 30425—2025 的 7.4.6 进行

电网换相直流融冰装置水冷设备试验结果应满足 5.4.2.7 的要求,模块化多电平直流融冰装置水冷设备试验结果应满足 5.5.2.7 的要求。

7 包装、运输和贮存

7.1 包装

产品包装应符合 GB/T 13384 的规定。随同产品包装一起提供的技术文件包括但不限于：
——装箱清单；

- 产品合格证明；
- 产品安装使用说明书；
- 产品成套及备件一览表。

7.2 运输

换流器在运输过程中,不应有剧烈振动和冲击,不应倾斜或倒置。

晶闸管阀和模块化多电平换流器阀的运输宜考虑温度、相对湿度及振动等方面的要求,保证安全可靠。阀本体的运输温度应为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度小于95%;阀基电子设备的运输温度应为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为5%~85%。制造商应提供设备的抗振程度,关键部分应采用振动记录设备。

7.3 贮存

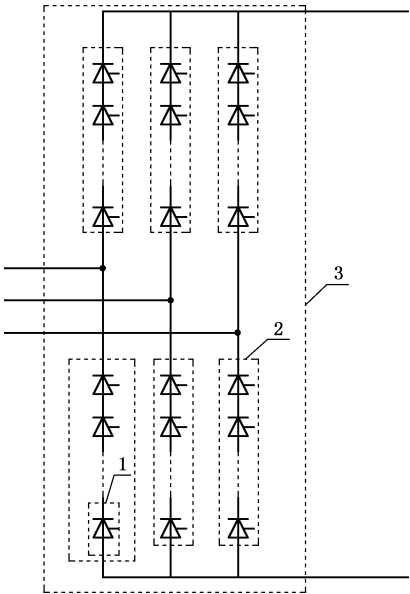
换流器贮存期间,如附带有水冷设备,应排除冷却液,放置在空气流通、无腐蚀性气体的仓库中,最低温度允许 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高允许温度 $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。贮存期间,不应淋雨、暴晒,避免出现凝露和霜冻。



附 录 A
(资料性)
直流融冰装置换流器拓扑

A.1 6 脉动电网换相换流器

6 脉动电网换相换流器的拓扑见图 A.1。



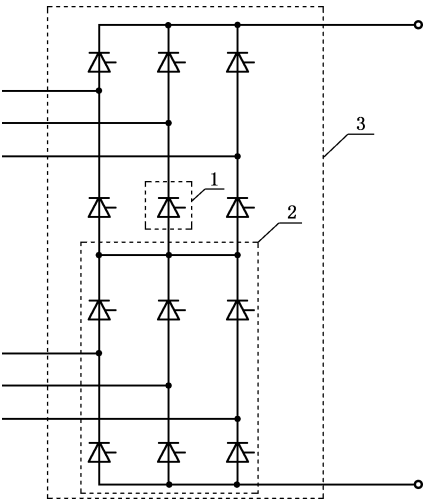
标引序号说明：
1——晶闸管级；
2——晶闸管阀；
3——6 脉动电网换相换流器。

图 A.1 6 脉动电网换相换流器

A.2 12 脉动电网换相换流器

12 脉动电网换相换流器的拓扑见图 A.2。





标引序号说明：

1——晶闸管阀；

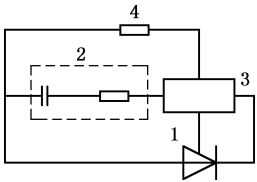
2——6 脉动电网换相换流器，两个 6 脉动电网换相换流器的三相输入电源之间的电角度之差为 30°；

3——12 脉动电网换相换流器。

图 A.2 12 脉动电网换相换流器

A.3 电网换相换流器的晶闸管级

典型晶闸管级的拓扑见图 A.3。



标引序号说明：

1——晶闸管；

2——阻尼电路；

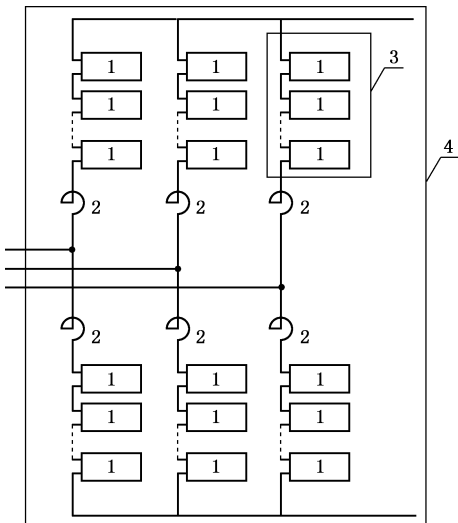
3——晶闸管电子电路；

4——静态均压电阻器。

图 A.3 典型晶闸管级

A.4 模块化多电平换流器

模块化多电平换流器的拓扑见图 A.4。

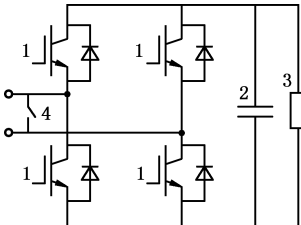


- 标引序号说明：
- 1——全桥子模块；
 - 2——桥臂电抗器；
 - 3——模块化多电平换流器阀；
 - 4——模块化多电平换流器。

图 A.4 模块化多电平换流器

A.5 模块化多电平换流器的子模块

模块化多电平换流器子模块的拓扑见图 A.5。

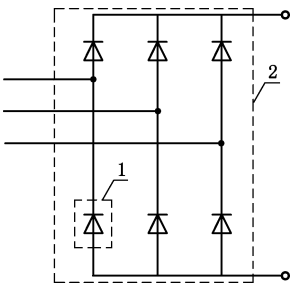


- 标引序号说明：
- 1——IGBT-二极管对；
 - 2——直流电容器；
 - 3——放电电阻器；
 - 4——旁路开关。

图 A.5 模块化多电平换流器的子模块

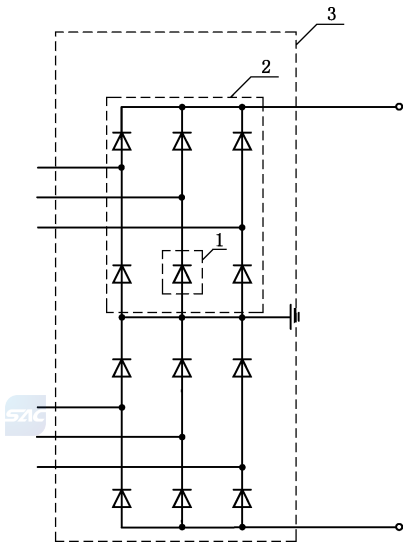
A.6 其他类型直流融冰装置换流器拓扑

除本文件规定的电网换相换流器和模块化多电平换流器外，直流融冰装置还存在不可控整流换流器和器件换流电流源换流器等类型，其原理如图 A.6、图 A.7 和图 A.8 所示。



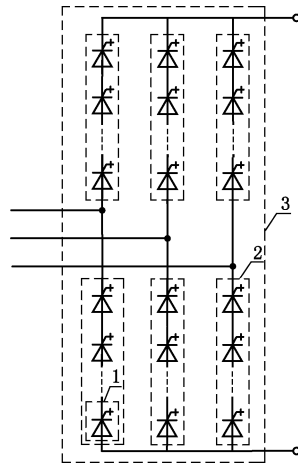
标引序号说明：
1——二极管；
2——6 脉动不可控整流换流器。

图 A.6 6 脉动不可控整流换流器



标引序号说明：
1——二极管；
2——6 脉动不可控整流换流器，两个 6 脉动桥换流器的三相输入电源之间的电角度之差为 30° ；
3——12 脉动不可控整流换流器。

图 A.7 12 脉动不可控整流换流器



标引序号说明:

- 1——逆阻型集成门极换流晶闸管(IGCT)级;
2——器件换流电流源换流器阀;
3——器件换流电流源换流器。

图 A.8 器件换流电流源换流器

附录 B

(资料性)

晶闸管阀的电气和冷却设计

B.1 晶闸管阀电气设计方法

B.1.1 设计流程

电网换相直流融冰装置用晶闸管阀电气设计流程如图 B.1 所示。

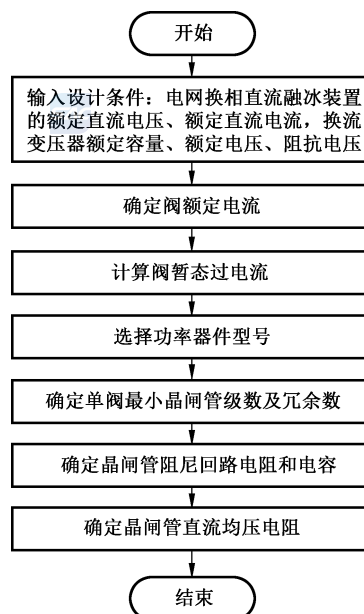


图 B.1 晶闸管阀电气设计流程

B.1.2 参数设计

B.1.2.1 阀额定电流的确定

阀的额定电流 I_{Vr} 满足公式(B.1)的要求:

$$I_{Vr} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times I_{dN} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

I_{dN} ——直流融冰装置额定直流电流,单位为千安(kA)。

B.1.2.2 阀暂态过电流的确定

正常情况下,晶闸管阀不仅能在额定直流电流和 2 h 过载工况下运行,而且在故障情况下,还具有一定的暂态过电流耐受能力。

当单个阀中所有的晶闸管全部短路或出现外部闪络等情况下,将产生两相短路电流,这种故障对晶闸管阀影响最为严重。此时,阀的最大短路电流满足公式(B.2)的要求:

$$I_k = \frac{I_{dN} \cdot U_{di0max}}{2d_{xmin} \cdot U_{di0N}} \times (1 + \cos\alpha_{min}) - \frac{I_{dmax}}{2} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

- I_k ——最大短路电流值,单位为千安(kA);
 $U_{di0\max}$ ——最大理想空载直流电压,单位为千伏(kV);
 $d_{x\min}$ ——最小相对感性电压降;
 U_{di0N} ——额定理想空载直流电压,单位为千伏(kV);
 α_{\min} ——最小触发延迟角,单位为度(°);
 $I_{d\max}$ ——最大直流电流,单位为千安(kA)。
 $U_{di0\max}$ 满足公式(B.3)的要求:

$$U_{di0\max} = \frac{U_{dN} + (d_{x\min} + d_{r\min}) \times \frac{I_{d\max}}{I_{dN}} \times U_{di0N} + U_T}{\cos\alpha_{\min}} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：

- U_{dN} ——额定直流电压,单位为千伏(kV);
 $d_{r\min}$ ——最小相对阻性电压降;
 U_T ——晶闸管阀的导通电压降,单位为千伏(kV)。

计算最大故障电流考虑的运行条件为:最高的阀侧绕组电压、最小的换流变压器漏抗、最大的交流系统短路水平和最小触发延迟角。通常情况下,故障电流最大值主要取决于换流变压器短路阻抗。在直流融冰装置技术规范中,应对晶闸管阀暂态过电流提出具体要求,并要求经过型式试验验证。

B.1.2.3 功率器件选型

根据晶闸管阀额定电流方均根值和暂态过电流值选择晶闸管。

晶闸管额定电流 I_T 满足公式(B.4)的要求:

$$I_T \geq \frac{2}{\pi} \times k_{2h} \times k_i \times I_{Vr} \dots\dots\dots (B.4)$$

式中：

- k_{2h} ——直流融冰装置额定直流电流 2 h 过载倍数;
 k_i ——电流裕度因数,对于直流融冰装置晶闸管阀,一般取 2.0~4.0。
 晶闸管的浪涌电流应大于预期的最大短路电流值。

B.1.2.4 阀晶闸管级数的确定

B.1.2.4.1 阀的最少晶闸管级数

在晶闸管阀承受各种过电压的情况下,不考虑冗余晶闸管级时,每级晶闸管平均承受的电压峰值不高于晶闸管的断态重复峰值电压,且裕度不少于 200%。

当晶闸管桥臂不配置换流阀避雷器时,晶闸管阀的最少晶闸管级数 N_{\min} 满足公式(B.5)的要求:

$$N_{\min} = N_t - N_r = \text{int}(\sqrt{2} \times k_v \times k_d \times U_{AC} / V_{DRM}) + 1 \dots\dots\dots (B.5)$$

式中：

- N_t ——阀中串联晶闸管级总数;
 N_r ——阀中串联晶闸管级冗余数;
 U_{AC} ——阀交流侧额定电压,单位为千伏(kV);
 k_v ——电网电压波动因数,一般取 1.1~1.2;
 k_d ——设计余量因数。设计余量因数与具体设计经验有关;
 V_{DRM} ——晶闸管的断态重复峰值电压,单位为千伏(kV)。

B.1.2.4.2 阀的晶闸管冗余级数

晶闸管阀的晶闸管冗余级数 N_r 满足公式(B.6)的要求:

$$N_r \geq \frac{F_r}{1 - F_r} \times N_{\min} \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

式中:

F_r ——晶闸管阀冗余度。

B.1.2.5 晶闸管阻尼回路计算

阻尼回路的具体参数主要与使用的晶闸管参数、设计允许的冗余度、变压器参数、阀整体结构、是否考虑取能作用等有关。设计时,需要针对不同的运行工况进行具体的分析和计算。阻尼回路中阻尼电容 C_d 满足公式(B.7)的要求:

$$C_d = \frac{\Delta Q_r \times (N_t - 1)}{\sqrt{2} U_{AC} \times (1/k_{ul} - 1)} \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

式中:

ΔQ_r ——恢复电荷差,单位为库伦(μC);

N_t ——晶闸管级数;

U_{AC} ——阀侧电压,单位为千伏(kV);

k_{ul} ——动态均压因数,取 0.9。

阻尼电阻 R_d 的满足公式(B.8)的要求:

$$R_d = k_{rc} \times \sqrt{L_k / C_d} \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

式中:

R_d ——阻尼电阻,单位为欧姆(Ω);

k_{rc} ——与限制过冲、晶闸管额定电压、晶闸管恢复电荷等参数有关,一般情况下取 0.7~3.2;当晶闸管额定电压超过 3 kV 时,一般取 1.2~1.5;

L_k ——阀侧等效电感值,为换流变压器等感抗电感值,单位为亨(H);

C_d ——阻尼电容,单位为法拉(F)。

一般情况下,直流融冰装置晶闸管阀阻尼回路参数参照表 B.1 选取。

表 B.1 晶闸管阀阻尼回路参数

序号	供选择参数	晶闸管额定电压(U_n) V	晶闸管额定电流 A	阻尼电容器电容值 μF	阻尼电阻器电阻值 Ω
1	参数 1	$U_n \leq 4\ 200$	350~3 000	0.1~2	20~100
2	参数 1	$4\ 200 < U_n \leq 6\ 500$	300~5 000	0.5~3	30~100

B.1.2.6 晶闸管直流均压电阻计算

对于直流分量,晶闸管阀中漏电流最小的晶闸管两端电压最高。为满足静态均压要求,静态均压电阻 R_{dc} 满足公式(B.9)的要求:

$$R_{dc} \leq \left(\frac{1}{k_{u2}} - 1 \right) \times \frac{\min(U_{DRM}, U_{RRM})}{\Delta I_{RMmax}} \quad \dots\dots\dots (B.9)$$

式中:

I_{RMmax} ——晶闸管的断态重复峰值电流 I_{DRM} 与反向重复峰值电流 I_{RRM} 的最大差值,单位为毫安

- (mA),典型值取 5 mA;
- U_{DRM} ——晶闸管的断态重复峰值电压,单位为千伏(kV);
- U_{RRM} ——晶闸管的反向重复峰值电压,单位为千伏(kV);
- k_{u2} ——直流分量均压因数可取 0.9。

B.2 晶闸管阀的电气设计示例

某工程电网换相直流融冰装置额定容量 250 MW,额定直流电压 50 kV,换流器采用 12 脉动电网换相换流器,直流侧不接地,交流侧通过一台 525 kV/66 kV 降压变压器接入 500 kV 系统,525 kV/66 kV降压变压器容量 320 MVA,阻抗电压 12%。

电网换相直流融冰装置主回路参数值如表 B.2 所示。

表 B.2 某工程电网换相直流融冰装置主回路参数设计值

设备	参数	值	备注
电网换相换流器	额定直流功率 P_{dc} /MW	250	—
	额定直流电压 U_{dN} /kV	50	—
	额定直流电流 I_{dN} /kA	5	—
	最小运行电流/kA	0.1	—
	触发角运行范围/(°)	0~90	—
换流变压器	网侧额定电压 $U_{1\text{N}}$ /kV	66	—
	阻抗电压/%	12	—
	阀侧额定电压 $U_{2\text{N}}$ /kV	20.5	—
	网侧额定电流 $I_{1\text{N}}$ /kA	2.8	—
	阀侧额定电流 $I_{1\text{N}}$ /kA	4.51	—
	阀侧绕组额定容量/MVA	160	y 绕组和 d 绕组
	网侧额定容量/MVA	320	D 绕组
平波电抗器	电感值/mH	20+20	两台,正负极各一台

本工程晶闸管阀的电气设计过程如下。

- a) 阀额定电流的确定
- 阀额定电流 I_{Vr} 根据公式(B.1)计算为 2.89 kA。
- b) 阀最大理想空载直流电压的确定
- 直流融冰装置额定直流电压 U_{dN} 为 50 kV,最小相对感性电压降 d_{xmin} 为 0.06,最小相对阻性电压降 d_{rmin} 为 0,最大直流电流 I_{dmax} 为 5.5 kA,额定直流电流 I_{dN} 为 5 kA,额定理想空载直流电压 U_{di0N} 为 27.61 kV,晶闸管阀的导通电压降 U_{T} 为 0,最小触发(延迟)角 α_{min} 为 5°,由公式(B.3)计算得到最大理想空载直流电压 U_{di0max} 为 26.92 kV。
- c) 阀暂态过电流的确定
- 阀暂态过电流 I_{k} 根据公式(B.2)计算为 78.36 kA。
- d) 功率器件选型
- 电流裕度因数 k_i 取 2.4,计算得到晶闸管额定电流 I_{T} 满足为 4.85 kA,选择表 B.3 所示晶闸管。

表 B.3 某工程电网换相直流融冰装置用晶闸管主要参数

参数	值
断态不重复峰值电压 V_{DSM}/kV	5.2
反向不重复峰值电压 V_{RSM}/kV	5.2
断态重复峰值电压 V_{DRM}/kV	4.6
反向重复峰值电压 V_{RRM}/kV	4.6
通态平均电流 $I_{\text{T(AV)}}/\text{kA}$	5
通态不重复浪涌电流 I_{TSM}/kA	85.2
恢复电荷 $Q_{\text{r}}/\mu\text{C}$	5 500
断态重复峰值电流 I_{DRM}/mA	700
反向重复峰值电流 I_{RRM}/mA	700
结壳热阻 $R_{\text{th(j-c)}}/(\text{K/W})$	0.004
接触热阻 $R_{\text{th(c-s)}}/(\text{K/W})$	0.000 8

- e) 晶闸管级数的确定
晶闸管断态重复峰值电压 V_{DRM} 为 4.6 kV, 电网电压波动因数 k_1 取 1.2, 设计余量因数 k_2 取 2.3, 由公式(B.5)计算得到阀的最小晶闸管级数 N_{min} 为 17。
- f) 晶闸管冗余级数的确定
晶闸管阀冗余度 F_{r} 取 0.1, 由公式(B.6)计算得到晶闸管冗余级数 N_{r} 为 2。
- g) 阻尼回路参数的确定
恢复电荷差 ΔQ_{r} 取 400 μC , 由公式(B.7)计算阻尼电容 C_{d} 为 2.11 μF 。
 k_{rc} 值取 1.4, 阀侧等效电感值 L_{k} 为 1.0 mH, 由公式(B.8)计算阻尼电阻 R_{d} 为 31 Ω 。
- h) 晶闸管直流均压电阻值的确定
漏电流最大差值 I_{RMmax} 取 5 mA, 由公式(B.9)计算得到静态均压电阻 R_{dc} 为 102 k Ω 。
由此, 在本设计实例中, 50 kV/250 MW 电网换相直流融冰装置用晶闸管阀电气参数设计结果如表 B.4 所示。

表 B.4 50 kV/250 MW 电网换相直流融冰装置用晶闸管阀参数设计结果

参数	值	备注
额定直流功率 P_{dc}/MW	250	—
额定直流电压 U_{dN}/kV	50	—
额定直流电流 I_{dN}/kA	5	—
额定直流电压对应触发角/(°)	15	—
触发角运行范围/(°)	5~90	—
最小运行电流 I_{min}/kA	0.1	—
换流变压器网侧额定电压 $U_{1\text{N}}/\text{kV}$	66	换流变压器一次侧电压
换流变压器阀侧额定电压 $U_{2\text{N}}/\text{kV}$	20.5	换流变压器二次侧电压
晶闸管阀中串联晶闸管级总数	19	含 2 只冗余

表 B.4 50 kV/250 MW 电网换相直流融冰装置用晶闸管阀参数设计结果 (续)

参数	值	备注
阻尼电容/ μF	2.4	—
阻尼电阻/ Ω	40	—
直流均压电阻/ $\text{k}\Omega$	102	—

B.3 晶闸管阀冷却设计方法

晶闸管阀冷却按如下流程设计。

a) 晶闸管损耗计算

晶闸管的通态损耗按照 GB/T 20989—2017 的公式(1)计算,关断损耗按照 GB/T 20989—2017 的公式(8)计算,总损耗为通态损耗和关断损耗之和。计算工况为零功率试验工况,即触发角与换相角之和 90° 。

b) 功率器件结温计算

功率器件稳态结温由公式(B.10)计算:

$$T_j = R_{th(j-a)} \cdot P_{AV} + T_{mean} \dots\dots\dots (B.10)$$

式中:

T_j —— 稳态结温,单位为开尔文(K);

$R_{th(j-a)}$ —— 功率器件结到冷却液的稳态热阻,单位为开尔文每瓦(K/W);

P_{AV} —— 功率器件结输出的平均功率,单位为瓦(W);

T_{mean} —— 冷却液平均温度,单位为开尔文(K)。

直流融冰装置通常不考虑秒级暂态过负荷,无需计算瞬态结温。如有需要,将公式(B.10)中的稳态热阻替换为晶闸管结到冷却液的瞬态热阻抗。

c) 冷却液温度和流量设计

阀的冷却是阀的重要组成部分,它主要是通过冷却液吸收功率器件及其辅助元件产生的热量,将这些热量通过热交换器转移至阀厅外大气中,冷却后的冷却液重新送入阀,循环往复,保证功率器件运行结温在正常范围内。

根据公式(B.11)计算阀进出口冷却液温升:

$$\Delta T_1 = \frac{Q}{m \cdot C} = \frac{P_T}{C \cdot Q_L \cdot \rho} \dots\dots\dots (B.11)$$

式中:

ΔT_1 —— 冷却液温升,单位为开尔文(K);

Q —— 表示热量,单位为焦耳(J);

m —— 冷却液质量,单位为千克(kg);

C —— 冷却液的比热容,单位为焦耳每千克开尔文[J/(kg · K)];

P_T —— 换流器总损耗,单位为瓦(W);

Q_L —— 冷却液的流量,单位为立方米每秒(m^3/s);

ρ —— 密度,单位为千克每立方米(kg/m^3)。

B.4 晶闸管阀冷却设计示例

采用 B.2 相同的工程示例,晶闸管的最高工作结温不超过 125°C ,每个阀内所有晶闸管的冷却回路

均采用并联布置。晶闸管的结壳热阻为 0.004 K/W,接触热阻 0.000 8 K/W。散热器的热阻与冷却液流量相关,稳态下,冷却流量为 6 L/min 时,散热器热阻为 0.005 K/W;极限工况(2 h 1.1 倍额定电流,最小冷却流量)下,冷却流量为 4.8 L/min 时,散热器热阻为 0.005 9 K/W。冷却液设定的进阀温度为 50 ℃。结温设计值为最高温度不超 110 ℃。晶闸管阀冷却设计结果如下。

a) 晶闸管损耗计算

稳态工况下,晶闸管损耗估算值为 4 005 W。

极限工况下,晶闸管的损耗估算值约为 4 276 W。

b) 功率器件结温的确定

——稳态工况下,结温设计值为最高温度不超 90 ℃。晶闸管损耗计算值为 4 005 W,则:

$$T_j = (0.005 + 0.004 + 0.000\ 8) \times 4\ 005 + 50 = 89.2\ ^\circ\text{C}$$

——极限工况下,结温设计值为最高温度不超 110 ℃。晶闸管的损耗计算值为 4 276 W,则:

$$T_{j1} = (0.005\ 9 + 0.004 + 0.000\ 8) \times 4\ 276 + 50 = 95.8\ ^\circ\text{C}$$

两种工况下的结温校核满足设计要求。

c) 冷却液温度和流量的确定

阀额定流量为 $6 \times 19 = 114\ \text{L/min}$,12 组阀总流量 $114 \times 12 = 1\ 368\ \text{L/min}$ 。忽略其他损耗的前提下,换流器总损耗约为 $4\ 005 \times 19 \times 12 = 913\ 140\ \text{W}$ 。冷却液纯水比例 82%,混合比热容为 $3\ 850.6\ \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,密度为 $1\ 021.6\ \text{kg/m}^3$ 。

上述参数代入公式(B.11)计算得到: $\Delta T_1 = 913\ 140 \times 1\ 000 / (3\ 850.6 \times 1\ 021.6 \times 1\ 368 \times 10^{-3} / 60) = 10.2\ \text{K}$

进阀水温温度设定为 50 ℃时,得到出阀水温为 60.2 ℃。

附录 C

(资料性)

模块化多电平换流器阀的电气和冷却设计

C.1 模块化多电平换流器阀电气设计方法

C.1.1 设计流程

模块化多电平换流器阀电气设计流程如图 C.1 所示。

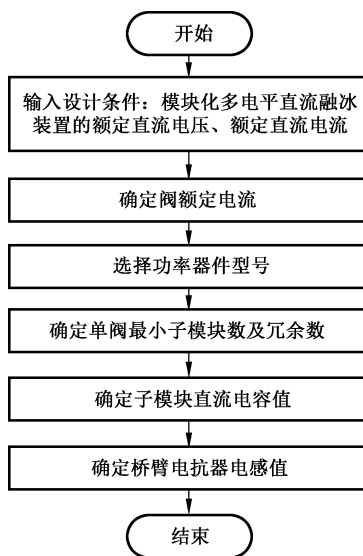


图 C.1 模块化多电平换流器阀电气设计流程

C.1.2 参数设计

C.1.2.1 阀额定电流的确定

阀额定电流 I_{armN} 满足公式(C.1)的要求：

$$I_{\text{armN}} = \sqrt{\frac{I_{\text{dN}}^2}{9} + \frac{I_{\text{VN}}^2}{4}} \quad \dots\dots\dots (\text{C.1})$$

式中：

I_{dN} ——模块化多电平直流融冰装置的额定直流电流，单位为千安(kA)；

I_{VN} ——模块化多电平直流融冰装置的额定交流电流，单位为千安(kA)。

如果兼有静止同步补偿功能，阀额定电流由直流融冰和静止同步补偿两种工况要求高的确定。

C.1.2.2 功率器件选型

根据模块化多电平换流器阀的额定电流选择功率器件型号。

功率器件的额定电流 I_{P} 满足公式(C.2)的要求：

$$I_{\text{P}} \geq k_{\text{L}} \times k_{\text{zh}} \times I_{\text{armN}} \quad \dots\dots\dots (\text{C.2})$$

式中：

k_{L} ——电流裕度因数，一般不小于 1.3；

k_{2h} ——模块化多电平直流融冰装置额定输出电流 2 h 过载倍数。

单只功率器件额定电流不满足要求时,可采用多只并联。

C.1.2.3 阀子模块数的确定

C.1.2.3.1 阀最少子模块数的确定

子模块平均直流电压取子模块功率器件额定电压的 0.45 倍~0.55 倍。

阀最少子模块数 N_{\min} 满足公式(C.3)的要求:

$$N_{\min} = \text{int} \left[\left(0.5U_{dN} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \left(k_v \times U_{VN} + \frac{Q_{\text{deicingN}} \cdot X}{2k_v \times U_{VN}} \right) \right) / V_{SM} \right] + 1 \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

U_{dN} ——模块化多电平直流融冰装置的直流电压,单位为千伏(kV);

k_v ——电网电压波动因数,一般取 1.1~1.2;

U_{VN} ——模块化多电平直流融冰装置接入交流母线的电压额定值,单位为千伏(kV);

Q_{deicingN} ——模块化多电平直流融冰装置额定融冰功率时额定动态无功补偿额定容量,单位为兆乏(Mvar);

X ——模块化多电平直流融冰装置桥臂电抗器的电抗值,单位为欧姆(Ω);

V_{SM} ——模块化多电平换流器阀子模块的额定平均直流电压,单位为千伏(kV)。

C.1.2.3.2 阀冗余子模块数的确定

阀冗余子模块数 N_r 满足公式(C.4)的要求:

$$N_r \geq \frac{F_r}{1 - F_r} \times N_{\min} \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

式中:

F_r ——模块化多电平换流器阀的冗余度。

C.1.2.4 子模块直流电容值的确定

子模块直流电容值满足公式(C.5)的要求:

$$C_m \geq \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \times \frac{U_{VN} \cdot I_{dN}}{N_{\min} \cdot V_{SM}^2 \cdot \omega \cdot \epsilon}, m_{ac} \geq 0.5209 \\ \frac{(4m_{dc}^2 - m_{ac}^2) I_{dN}}{6\omega m_{ac} \epsilon V_{SM}} \times \sqrt{1 - \frac{m_{ac}^2}{4m_{dc}^2}}, m_{ac} < 0.5209 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

式中:

m_{ac} ——模块化多电平换流器的交流调制比,即 $m_{ac} = \frac{\sqrt{2} \times U_{fl}}{\sqrt{3} \times N_{\min} \cdot V_{SM}}$,其中 U_{fl} 为换流器输出交流

线电压基波分量方均根值;

m_{dc} ——模块化多电平换流器的直流调制比,即 $m_{dc} = \frac{U_{dN}}{2N_{\min} \cdot V_{SM}}$;

C_m ——模块化多电平换流器阀的子模块电容值,单位为法拉(F);

ω ——工频角频率,单位为弧度每秒(rad/s);

ϵ ——模块化多电平换流器阀的子模块直流电容器纹波限值。

C.1.2.5 桥臂电抗器电感值的确定

考虑功率器件额定电流和阀故障电路上升率限制,桥臂电抗器电感值满足公式(C.6)的要求:

$$L_{\text{arm1}} \geq U_{\text{dN}}/2d_{\text{IT}} \quad \dots\dots\dots (\text{C.6})$$

式中：

L_{arm1} ——考虑功率器件额定电流和阀故障电流上升率限制的桥臂电抗器电感值；

d_{IT} ——桥臂电流上升率，单位为安培每毫秒(A/ms)。

考虑滤波需求，桥臂电抗器电感值设计满足公式(C.7)的要求：

$$L_{\text{arm2}} \geq K \times \frac{2U_{\text{VN}}^2}{\omega \cdot U_{\text{dN}} \cdot I_{\text{dN}}} \quad \dots\dots\dots (\text{C.7})$$

式中：

L_{arm2} ——考虑滤波需求的桥臂电抗器电感值；

U_{VN} ——模块化多电平直流融冰装置接入交流母线的线电压额定值，单位为千伏(kV)；

ω ——工频角频率，单位为弧度每秒(rad/s)；

K ——桥臂电抗器电抗值的标么值。直流融冰装置接入 10 kV 系统时， K 取值宜不小于 10%；
直流融冰装置接入 35 kV 系统时， K 取值宜不小于 8%。

为避免换流器内部发生二倍频谐振情况，桥臂电抗器电感值、子模块电容值和阀子模块数量满足公式(C.8)的要求：

$$L_{\text{arm3}} \geq \frac{N}{9.6\omega^2 \cdot C_{\text{m}}} \quad \dots\dots\dots (\text{C.8})$$

式中：

L_{arm3} ——考虑换流器二倍频谐振抑制的桥臂电抗器电感值；

N ——模块化多电平换流器阀的子模块数(含冗余)；

ω ——工频角频率，单位为弧度每秒(rad/s)；

C_{m} ——模块化多电平换流器阀子模块的电容值，单位为法拉(F)。

桥臂电抗器电感值的取值不小于 L_{arm1} 、 L_{arm2} 和 L_{arm3} 中的最大值。

C.2 模块化多电平换流器阀电气设计示例

某工程模块化多电平直流融冰装置额定容量 80 MW，额定直流电压 20 kV，采用图 A.4 所示主接线，换流器采用全桥子模块的模块化多电平换流器，对称单极接线，直流侧不接地，交流侧直接接入 500 kV 变电站主变压器低压侧。主变压器电压 525 kV/230 kV/35 kV、容量 750 MVA，高-中阻抗电压 14%、高-低阻抗电压 55%、中-低阻抗电压 40%。

模块化多电平直流融冰装置主回路参数设计值如表 C.1 所示。

表 C.1 某工程模块化多电平直流融冰装置主回路参数

设备	参数	值
模块化多电平换流器	额定直流功率 P_{dc} /MW	80
	额定直流电压 U_{dNc} /kV	20
	额定直流电流 I_{dN} /kA	4
	最小运行电流/kA	0.05
	额定交流电压 U_{IN} /kV	35
	额定交流电流 I_{VN} /kA	1.32
	桥臂额定电流 I_{armN} /kA	1.49

表 C.1 某工程模块化多电平直流融冰装置主回路参数 (续)

设备	参数	值
模块化多电平换流器	桥臂电抗器电感/mH	7.80
	额定融冰功率下动态无功额定容量 Q_{deicingN} /Mvar	0
	静止同步补偿模式下无功补偿容量 Q /Mvar	180

本工程模块化多电平换流器阀的电气设计过程如下。

a) 阀额定电流的确定

额定直流电流 I_{dN} 为 4 kA, 额定交流电流 I_{VN} 为 1.32 kA, 由公式(C.1)计算得到模块化多电平换流器阀额定电流 I_{armN} 为 1.49 kA。

b) 功率器件选型

本示例中, 额定直流电流 I_{dN} 为 4 kA, 2 h 过载倍数为 1.1, 电流裕度因数 k_L 取 1.4, 计算得到功率器件额定电流需大于 2.13 kA, 采用表 C.2 所示 IGBT 器件两只并联, 功率器件并联均流因数取 0.9。

表 C.2 某工程模块化多电平直流融冰装置换流器阀用 IGBT 器件主要参数

参数	值
集电极-发射极电压 V_{CES}/V	1 700
集电极电流 I_{C}/A	1 400
集电极峰值电流 I_{CRM}/A	2 800
集电极-发射极饱和电压 $V_{\text{CE(sat)}}/\text{V}$	2.0 @ 125 °C
二极管正向直流电流 I_{F}/A	1 400
二极管正向电压 V_{F}/V	1.9 @ 125 °C
IGBT 结壳热阻 $R_{\text{th(j-c)}} \text{ IGBT}/(\text{K}/\text{W})$	0.016 6
二极管结壳热阻 $R_{\text{th(j-c)}} \text{ diode}/(\text{K}/\text{W})$	0.030 2
接触热阻 (IGBT) $R_{\text{th(c-s)}} \text{ IGBT}/(\text{K}/\text{W})$	0.012
接触热阻 (Diode) $R_{\text{th(c-s)}} \text{ diode}/(\text{K}/\text{W})$	0.012

c) 子模块额定平均直流电压的确定

功率器件集电极-发射极电压为 1 700 V, 子模块额定平均直流电压选为 900 V。

d) 阀最少子模块数的确定

直流融冰装置的额定直流电压 U_{dN} 为 20 kV, 电网电压波动因数 k_V 为 1.2, 接入交流母线的电压额定值 U_{VN} 为 35 kV, 额定融冰功率时动态无功补偿额定容量 Q_{deicingN} 为 0, 子模块的额定平均直流电压 V_{SM} 为 0.9 kV, 由公式(C.3)计算得到模块化多电平换流器阀的最小子模块级数 N_{min} 为 50。

e) 阀冗余子模块数的确定

冗余度 F_r 取 0.1, 由公式(C.4)计算得到模块化多电平换流器阀的冗余子模块数大于或等于 6。

f) 子模块电容值的确定

$$\text{交流调制比 } m_{\text{ac}} = \frac{\sqrt{2} \times U_{\text{fl}}}{\sqrt{3} \times N_{\text{min}} \cdot V_{\text{SM}}} = \frac{\sqrt{2} \times 35}{\sqrt{3} \times 50 \times 0.9} = 0.635 \text{ 1};$$

$$\text{直流调制比 } m_{\text{dc}} = \frac{U_{\text{dN}}}{2N_{\text{min}} \cdot V_{\text{SM}}} = \frac{20}{2 \times 50 \times 0.9} = 0.222 \text{ 2};$$

换流器输出交流线电压基波分量方均根值为 35 kV, 阀最少子模块数为 50, 子模块额定平均直流电压为 0.9 kV, 额定直流电压 U_{dN} 为 20 kV, 接入交流母线的电压额定值 U_{VN} 为 35 kV, 额定直流电流 I_{dN} 为 4 kA, 子模块电容器纹波限值 ϵ 取为 10%, 工频角频率为 314 rad/s。由于 $m_{\text{ac}} > 0.520 \text{ 9}$, 因此子模块电容值由公式(C.5)计算得到:

$$C_{\text{m}} \geq \frac{\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \times \frac{U_{\text{VN}} \cdot I_{\text{dN}}}{N_{\text{min}} \cdot V_{\text{SM}}^2 \cdot \omega \cdot \epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \times \frac{35 \times 4}{50 \times 0.9^2 \times 314 \times 0.1} = 0.029 \text{ 96}$$

即子模块电容为 0.029 96 F。

g) 桥臂电抗器电感值的校核

本例中, 额定直流电压 U_{dN} 为 20 kV; 器件额定电流为 1.4 kA, 两只并联, 均流因数取 0.9, 桥臂电流上升率允许值 d_{IT} 计算得到 $1.4 \times 2 \times 0.9 = 2.52 \text{ kA/ms}$, 由式(C.6)计算得到 L_{arm1} 为 3.97 mH。本例中, 接入交流母线的电压额定值 U_{VN} 为 35 kV; 工频角频率为 314 rad/s; 直流融冰装置接入 35 kV 系统时, 桥臂电抗器电抗值的标幺值 K 取值为 8%; 额定直流电压 U_{dN} 为 20 kV, 额定直流电流 I_{dN} 为 4 kA, 由公式(C.7)计算得到 L_{arm2} 为 7.8 mH。

本例中, 模块化多电平换流器阀的子模块数(含冗余)为 56 个, 工频角频率为 314 rad/s, 子模块的电容值 0.029 96。由公式(C.8)计算得到 L_{arm3} 为 2.0 mH。

桥臂电抗器电感值的取值为不小于 L_{arm1} 、 L_{arm2} 和 L_{arm3} 的最大值, 系统设计给出的表 C.1 中桥臂电抗器电感为 7.8 mH, 满足桥臂电抗器取值范围要求。

模块化多电平换流器阀电气设计结果如表 C.3 所示。

表 C.3 20 kV/80 MW 直流融冰装置模块化多电平换流器阀电气设计结果

参数	值	备注
额定容量 P_{dc}/MW	80	—
额定直流电压 U_{dN}/kV	20	—
额定直流电流 I_{dN}/kA	4.0	—
额定融冰功率下无功容量 $Q_{\text{deicingN}}/\text{Mvar}$	0	—
交流电压额定值 U_{VN}/kV	35	—
桥臂电抗器 L_{arm}/mH	7.8	—
桥臂输出电压 V_{arm}/kV	44.29	—
功率器件额定电压 U_{P}/kV	1.7	子模块选用额定电压为 1 700 V 的 IGBT 器件, 两只并联
功率器件额定电流 I_{P}/kA	1.4	
子模块电容/mF	29.96	—
子模块额定直流电压/kV	0.9	—
阀最少子模块数 $N_{\text{min}}/\text{个}$	50	—
阀冗余子模块数 $N_{\text{r}}/\text{个}$	6	—

C.3 模块化多电平换流器阀冷却设计方法

模块化多电平换流器的阀冷却按如下流程设计。

a) 子模块损耗计算

模块化多电平换流器子模块损耗按照 GB/T 35702.2—2017 计算,子模块为全桥结构,考虑到全桥子模块两边功率管损耗基本一致,计算子模块损耗时按照半桥子模块结构进行等效处理。IGBT 通态损耗按照 GB/T 35702.2—2017 的公式(1)估算,开关损耗按照 GB/T 35702.2—2017 的公式(14)估算。二极管通态损耗按照 GB/T 35702.2—2017 的公式(6)估算,关断损耗按照 GB/T 35702.2—2017 的公式(15)估算,子模块总损耗为 IGBT 通态损耗、IGBT 开关损耗、二极管通态损耗和二极管关断损耗之和。

更准确的损耗数据按照 GB/T 35702.2—2017 进行数值仿真获得。

- b) 功率器件结温计算
见 B.3 的 b)。
- c) 冷却液温度和流量设计
见 B.3 的 c)。

C.4 模块化多电平换流器阀冷却设计示例

采用 C.2 相同的工程示例,IGBT 的最高工作结温不超过器件手册中规定的工作结温最大值;每个阀内每 3 个子模块构成一组,冷却回路采用串联布置,每组子模块再采用并联的冷却回路。IGBT 的结壳热阻为 0.016 6 K/W,接触热阻 0.012 K/W;内置反并联二极管的结壳热阻 0.030 2 K/W,接触热阻 0.012 K/W。散热器的热阻与冷却液流量相关,本示例中冷却液流量同时覆盖了稳态工况和极限工况的需求,冷却流量为 13 L/min 时,散热器热阻为 0.013 6 K/W,冷却液设定的进阀温度为 50 °C,结温设计值为最高温度不超过 120 °C。阀冷却设计结果如下。

- a) 子模块损耗
稳态工况下,单支 IGBT 损耗估算值为 944 W,单支二极管损耗估算值为 330 W,子模块的损耗估算值为 5 090 W。
极限工况下,单支 IGBT 损耗估算值为 1 081 W,单支二极管损耗估算值为 370 W,子模块的损耗估算值为 5 802 W。

- b) 功率器件结温

1) 稳态工况

单个子模块的损耗计算值为 5 090 W,冷却液纯水比例 85%,混合比热容为 3 800 J/(kg·K),密度为 1 055 kg/m³,单个功率单元进出水口温差为:

$$\Delta T = 5\,090 / (3\,800 \times 1\,055 \times 13 \times 10^{-3} / 60) = 5.9 \text{ K}$$

经过损耗计算,单支 IGBT 损耗为 994 W,单支二极管损耗为 330 W。对于 3 个子模块串联的冷却回路,最后一级子模块功率器件的结温为:

$$\text{IGBT 结温 } T_{j_IGBT} = (0.013\,6 + 0.016\,6 + 0.012) \times 944 + 50 + 5.9 + 5.9 = 101.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{二极管结温 } T_{j_diode} = (0.013\,6 + 0.030\,2 + 0.012) \times 330 + 50 + 5.9 + 5.9 = 80.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2) 极限工况

单个子模块的计算值损耗为 5 802 W,则子模块进出水口温差为:

$$\Delta T = 5\,802 / (3\,800 \times 1\,055 \times 13 \times 10^{-3} / 60) = 6.7 \text{ K}$$

经过损耗计算,单支 IGBT 损耗为 1 081 W,单支二极管损耗为 370 W,则对于 3 个子模块串联的冷却回路,最后一级子模块功率器件的结温为:

$$\text{IGBT 结温 } T_{j_IGBT} = (0.013\,6 + 0.016\,6 + 0.012) \times 1\,081 + 50 + 6.7 + 6.7 = 109 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{二极管结温 } T_{j_diode} = (0.013\,6 + 0.030\,2 + 0.012) \times 370 + 50 + 6.7 + 6.7 = 84 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

两种工况下的结温校核满足设计要求。

- c) 冷却液温度和流量设计

本例中,阀的冷却液额定流量为 $13 \times 56 / 3 = 242.7 \text{ L/min}$,模块化多电平换流器阀的总流量

$242.7 \times 6 = 1\,456.2$ L/min。忽略其他损耗的前提下,换流器的总损耗为 $5.09 \times 56 \times 6 = 1\,710.2$ kW。冷却液纯水比例 85%,混合比热容为 $3\,800$ J/(kg·K),密度为 $1\,055$ kg/m³。

根据公式(B.11),计算得温升为:

$$\Delta T_1 = 1\,710.2 \times 1\,000 / (3\,800 \times 1\,456.2 \times 10^{-3} \times 1\,055 / 60) = 17.6 \text{ K}$$

进阀水温温度设定为 50 °C 时,出阀水温为 67.6 °C。
