



中华人民共和国国家标准

GB/T 31487.1—2025

代替 GB/T 31487.1—2015

直流融冰装置 第1部分：系统设计

Direct current deicers—Part 1: System design

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	2
4 设计条件	7
4.1 融冰线路	7
4.2 直流融冰装置配置站	7
5 成套设计	8
5.1 通则	8
5.2 导线和地线融冰方式	8
5.3 主回路参数设计	8
5.4 接入系统方式	9
5.5 直流融冰装置型式与电气主接线	9
5.6 融冰回路中的感应电压和感应电流	10
5.7 有融冰需求的地线绝缘设计	11
5.8 直流融冰装置的过电压保护和绝缘配合	12
5.9 直流融冰装置与线路的连接	13
6 功能和性能要求	14
6.1 直流融冰装置正常使用条件	14
6.2 电网换相直流融冰装置	15
6.3 模块化多电平直流融冰装置	19
7 检验规则	21
7.1 总则	21
7.2 型式试验和例行试验	22
7.3 现场试验	25
8 运行与维护	29
8.1 通则	29
8.2 运行方式	29
8.3 设备维护	29
附录 A (资料性) 架空线路融冰电流的计算方法	31
A.1 架空线路覆冰类型	31
A.2 架空导线和地线融冰电流计算方法	31

附录 B (资料性) 架空线路最大允许融冰电流的计算方法	42
B.1 计算参数	42
B.2 导线和地线最大允许融冰电流的计算方法	42
附录 C (资料性) 直流融冰系统电气主接线及典型直流电压可融导线和地线最大长度	53
C.1 直流融冰系统电气主接线	53
C.2 各融冰接线方式的典型直流电压可融导线和地线最大长度	59
附录 D (资料性) 绝缘地线连接及绝缘子与金具	64
D.1 耐张绝缘子串	64
D.2 悬垂绝缘子串	64
D.3 光缆接头盒	65
D.4 光缆光电分离接头盒	65
D.5 架空地线非融冰分段点耐张塔地线导通引流接线	66
D.6 耐张塔光纤复合地线接线	67
附录 E (资料性) 直流融冰装置与融冰线路的连接	69
E.1 站内融冰隔离开关、接地开关及其连接	69
E.2 站外融冰隔离开关和接地开关及其连接	75
E.3 直流融冰装置与融冰线路的临时接线	77
附录 F (资料性) 直流融冰装置设计方法及主回路典型参数	79
F.1 电网换相直流融冰装置设计	79
F.2 模块化多电平直流融冰装置设计	88
F.3 直流融冰装置主回路典型参数	95
附录 G (资料性) 直流融冰装置的典型保护配置	99
G.1 电网换相直流融冰装置典型保护配置	99
G.2 模块化多电平直流融冰装置典型保护配置	100
附录 H (资料性) 导线和地线直流融冰流程	103
H.1 线路停电导线直流融冰流程	103
H.2 线路停电地线直流融冰流程	104
H.3 线路不停电地线直流融冰流程	105
参考文献	106

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1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 31487.1—2015《直流融冰装置 第1部分：系统设计和应用导则》，与 GB/T 31487.1—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）；
- 增加了术语“线路停电融冰”“线路不停电地线融冰”“阀”“换流器”“电网换相换流器”“模块化多电平换流器”“融冰母线”“地线融冰引接线”“电网换相直流融冰装置”“模块化多电平直流融冰装置”“设计融冰电压”“融冰母线装置侧隔离开关”“融冰母线线路侧隔离开关”“导线和地线联络隔离开关”“地线和引接线联络隔离开关”“导线短接隔离开关”“地线短接隔离开关”“换流器直流侧接地开关”“换流器交流侧接地开关”“直流极母线接地开关”“融冰母线接地开关”“地线接地开关”“检修状态”“冷备用状态”“热备用状态”“交流侧热备用状态”“运行状态”“当前状态”“目标状态”“融冰顺序控制”“等效试验”“维护试验”“现场试验”“设备试验”“分系统试验”“系统试验”（见 3.1.1、3.1.2、3.2.1～3.2.4、3.2.6、3.2.7、3.2.9、3.2.10、3.3.4、3.4.1～3.4.11、3.5.1～3.5.5、3.6.1～3.6.3、3.7.3～3.7.8）；
- 更改了术语“直流融冰装置”“最小融冰电流”“设计融冰电流”“感应电压”“感应电流”“最大允许融冰电流”“额定输入电压”“额定输出电流”“额定输出电压”“额定输出功率”“最小运行电流”的定义（见 3.2.8、3.3.1～3.3.3、3.3.5～3.3.11，2015年版的 3.2、3.7～3.10、3.14、3.18 和 3.19）；
- 删除了术语“子系统”（见 2015年版的 3.4）；
- 更改了设计条件（见第4章，2015年版的 4.1～4.3）；
- 更改了“成套设计的通则”“主回路参数设计”“接入系统方式”“直流融冰装置型式与电气主接线”“直流融冰装置过电压保护和绝缘配合”“直流融冰装置与线路连接”的规定（见 5.1、5.3～5.5、5.8 和 5.9，2015年版的 5.1～5.6）；
- 增加了“导线和地线融冰方式”“融冰回路中的感应电压和感应电流”“有融冰需求的地线绝缘设计”的规定（见 5.2、5.6 和 5.7）；
- 删除了“安装”“防火”和“通风”的规定（见 2015年版的 5.7 和 5.8）；
- 更改了“电网换相直流融冰装置的通则”“控制功能”“故障类型和保护功能”“谐波性能”“损耗”“无线电干扰”“换流变压器”“直流测量装置”“控制保护装置”“交流侧滤波器”“直流侧隔离开关”“直流侧接地开关”“直流侧避雷器”和“其他设备”的规定（见 6.2.1～6.2.3、6.2.4.1、6.2.4.2、6.2.4.4、6.2.5.2、6.2.5.4～6.2.5.9 和 6.2.5.11，2015年版的 6.1、6.2、6.4～6.6、6.8、7.3、7.6～7.11）；
- 增加了“直流融冰装置正常使用条件”“电网换相换流器技术要求”“直流侧接地开关”“直流侧保护间隙”“模块化多电平直流融冰装置”的规定（见 6.1、6.2.5.1、6.2.5.9、6.2.5.10 和 6.3）；
- 删除了“等效试验”“晶闸管阀”“冷却设备”“换相电抗器”“阀电抗器”的规定（见 2015年版的

6.3、7.1、7.2、7.4 和 7.5)；

——删除了“融冰运行方式研究”(见 2015 年版的第 8 章)；

——增加了“检验规则”的规定(见第 7 章)；

——更改了直流融冰装置运行和维护的规定(见第 8 章,2015 年版的第 9 章)。

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、中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司、南方电网能源发展研究院有限责任公司、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、国网河南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、辽宁荣信兴业智能电气有限公司、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、西安西电避雷器有限责任公司。

本文件主要起草人:傅闯、雷鸣、许钊、辛清明、魏伟、杨晓辉、代书龙、周月宾、周会高、汪鹏、毛先胤、李欢、蔚红旗、徐迪臻、徐望圣、曹伟伟、冯俊杰、李凌飞、侯婷、钟尧、黄超、邹常跃、曾华荣、赵晓斌、樊灵孟、王皆庆、董添华、李婧靓、姜海博、任孟干、万启发、李春华、陈慧、陈超泉、黄剑湘、洪权炜、李胜男、周启文、李凯、牛唯、唐金昆、金涛、崔康生、王立平、王强、曹鹏、杨旗、贺春、田杰、许建中、李斌、许树楷、方红伟、徐吉来、何佳伟、张翔、王靓、闫鑫、王泽昊、李道豫、刘菲、班国邦、邹雕、吴有、陈怡静、张建平、彭向阳、李彬彬、张磊、廖汉卿、刘湘、周陈韬、梁宁、陈名、谢惠藩、盛财旺、马晓红、黄桂灶、侯小平、秦康、李超、刘超、杨琳、王小岭、廖名洋、刘永鑫、饶斌斌、林旭涛、黄石华、王杰峰、邓超平、林梓圻、纪传祺、郭培、彭光强、张悻宁、罗炜、吴怡敏、吴广宁、关胜利、蔡定国。

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 31487.1—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1部分：系统设计

1 范围

本文件界定了直流融冰装置系统设计的术语,规定了直流融冰装置的设计条件、成套设计、功能和性能要求、检验规则、运行与维护要求。

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,其他电压等级输电线路和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 311.1 绝缘配合 第1部分:定义、原则和规则
- GB/T 311.2 绝缘配合 第2部分:使用导则
- GB/T 311.3 绝缘配合 第3部分:高压直流换流站绝缘配合程序
- GB/T 1094.1—2013 电力变压器 第1部分:总则
- GB/T 1094.2—2013 电力变压器 第2部分:液浸式变压器的温升
- 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 1094.6—2011 电力变压器 第6部分:电抗器
- GB/T 1094.10—2022 电力变压器 第10部分:声级测定
- GB/T 1984 高压交流断路器
- GB/T 1985—2023 高压交流隔离开关和接地开关
- GB 3096 声环境质量标准
- GB/T 7261 继电保护和安全自动装置基本试验方法
- GB/T 11022 高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求
- GB/T 11024.1 标称电压 1 000 V 以上交流电力系统用并联电容器 第1部分:总则
- GB/T 11032—2020 交流无间隙金属氧化物避雷器
- GB 12348—2008 工业企业厂界环境噪声排放标准
- GB/T 14549 电能质量 公用电网谐波
- GB/T 15543 电能质量 三相电压不平衡
- GB/T 15945 电能质量 电力系统频率偏差
- GB/T 17623 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法
- GB/T 18494.2—2022 变流变压器 第2部分:高压直流输电用换流变压器
- GB/T 20840.1 互感器 第1部分:通用技术要求
- GB/T 20840.2 互感器 第2部分:电流互感器的补充技术要求
- GB/T 20840.3 互感器 第3部分:电磁式电压互感器的补充技术要求
- GB/T 20994 高压直流输电系统用并联电容器及交流滤波电容器
- GB/T 26216.1 高压直流输电系统直流电流测量装置 第1部分:电子式直流电流测量装置

GB/T 26217 高压直流输电系统直流电压测量装置
GB/T 30547—2023 高压直流输电系统滤波器用电阻器
GB/T 31487.2—2025 直流融冰装置 第2部分:换流器
GB/T 31487.3—2025 直流融冰装置 第3部分:试验
GB/T 36955 柔性直流输电用启动电阻技术规范
GB/T 50064 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范
GB 50150 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准
GB 50545—2010 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范
JB/T 501—2021 电力变压器试验导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 融冰方式

3.1.1

线路停电融冰 **deicing with transmission line shutdown**

输电线路停电,对覆冰导线和地线进行融冰。

3.1.2

线路不停电地线融冰 **ground wire deicing without transmission line shutdown**

输电线路不停电,对覆冰地线进行融冰。

3.1.3

直流融冰 **direct current deicing; DC deicing**

对覆冰输电线路导线或地线施加直流电流,利用电流热效应消除线路覆冰。

3.1.4

“一相对一相”融冰 **“one phase to one phase” deicing**

“1-1”融冰 **“one-one” deicing**

输电线路两相导线串联形成直流电流回路的融冰接线方式。

3.1.5

“一相对两相”融冰 **“one phase to two phase” deicing**

“1-2”融冰 **“one-two” deicing**

输电线路两相导线并联后和第三相导线串联形成直流电流回路的融冰接线方式。

3.2 设备和系统

3.2.1

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。

3.2.2

换流器 **converter**

将交流电能转换为直流电能或将直流电能转换为交流电能的装置,该装置连接三个交流端子和两个直流端子。

[来源:GB/T 34118—2017,5.2,有修改]

3.2.3

电网换相换流器 **line-commutated converter; LCC**

由交流系统提供换相电压,采用晶闸管作为换流元件的换流器。

3.2.4

模块化多电平换流器 **modular multi-level converter; MMC**

每个阀由若干个全桥子模块串联组成的多电平换流器。

[来源:GB/T 34118—2017,6.4,有修改]

3.2.5

均流因数 **factor of current distribution**

直流融冰装置换流器采用多换流器并联型式时,并联运行支路电流的平均值与最大支路电流值之比。

3.2.6

融冰母线 **deicing busbar**

直流融冰系统中,用于连接直流融冰装置与待融冰覆冰导线或地线的站内母线。

3.2.7

地线融冰引接线 **ground line deicing lead wire**

线路不停电地线直流融冰系统中,用于连接待融冰地线段与融冰母线(或直接连接直流融冰装置)的站外线路。

3.2.8

直流融冰装置 **direct current deicer; DC deicer**

为覆冰输电线路提供稳定且可调的直流电流,实现融冰的装置。

3.2.9

电网换相直流融冰装置 **line-commutated DC deicer**

采用晶闸管作为整流电路开关器件,通过控制晶闸管移相控制角实现整流的直流融冰装置。

3.2.10

模块化多电平直流融冰装置 **modular multi-level DC deicer**

采用全控器件作为整流电路开关器件,通过模块化多电平换流器技术实现整流的直流融冰装置。

3.2.11

直流融冰系统 **DC deicing system**

由直流融冰装置、配电装置和被融冰线路等组成的系统。

3.3 成套设计

3.3.1

最小融冰电流 **minimum deicing current**

在确定的时间内使导线和地线上覆冰融化的临界电流。

3.3.2

最大允许融冰电流 **allowed maximum deicing current**

导线和地线中允许通过的最大电流。

3.3.3

设计融冰电流 **designed deicing current**

确保导线或地线上覆冰在预期时间内完全脱落的电流值,为最小融冰电流值与可靠因数的乘积。

3.3.4

设计融冰电压 designed deicing voltage

所有融冰工况(被融冰导线和地线中电流为各自设计融冰电流)下,直流融冰装置需要输出的直流电压最大值。

3.3.5

感应电压 induced voltage

同塔或邻近运行的线路在直流融冰回路中感应出的电压。

注:交流线路运行时,在与其同塔或邻近的导线和地线上产生电容耦合和电磁感应电压。直流线路运行时,在与其同塔或邻近的导线和地线上产生电容耦合和空间电荷感应电压。

3.3.6

感应电流 induced current

直流融冰回路中感应电压使载流子移动产生的电流。

3.3.7

额定输入电压 rated input voltage

直流融冰装置接入电源侧的额定交流电压。

3.3.8

额定输出电流 rated output current

在规定的使用条件下,直流融冰装置输出的直流电流值。



3.3.9

额定输出电压 rated output voltage

在规定的使用条件下,直流融冰装置输出的直流电压值。

3.3.10

额定输出功率 rated output power

在规定的使用条件下,直流融冰装置输出的直流功率值。

3.3.11

最小运行电流 minimum operation current

在规定的使用条件下,直流融冰装置能长时间稳定输出的不出现断续的最小直流电流值。

注:主要由直流融冰装置换流器型式和融冰回路中电感值决定。

3.4 融冰隔离开关和接地开关

3.4.1

融冰母线装置侧隔离开关 deicing busbar device side disconnecter

直流融冰系统中,用于实现直流融冰装置与融冰母线连接及线路融冰方式选择,融冰母线靠近直流融冰装置侧的隔离开关。

3.4.2

融冰母线线路侧隔离开关 deicing busbar line side disconnecter

直流融冰系统中,用于实现直流融冰装置与融冰线路的连接,融冰母线靠近线路侧的隔离开关。

3.4.3

导线和地线联络隔离开关 disconnecter between conductor and ground line

线路停电地线直流融冰系统中,用于地线与导线连接的隔离开关。

3.4.4

地线和引接线联络隔离开关 disconnecter between ground line and lead wire

线路不停电地线直流融冰系统中,用于地线与地线融冰引接线连接的隔离开关。

3.4.5

导线短接隔离开关 **disconnecter for conductors short circuit**

直流融冰系统中,根据融冰需求用于三相导线或者两相导线短接的隔离开关。

3.4.6

地线短接隔离开关 **disconnecter for ground lines short circuit**

直流融冰系统中,用于两平行地线一端短接的隔离开关。

3.4.7

换流器直流侧接地开关 **converter DC side earth switch**

直流融冰系统中,用于直流融冰装置换流器直流侧接地的接地开关。

3.4.8

换流器交流侧接地开关 **converter AC side earth switch**

直流融冰系统中,用于直流融冰装置换流器交流侧接地的接地开关。

3.4.9

直流极母线接地开关 **DC pole busbar earth switch**

直流融冰系统中,用于直流融冰装置直流极母线接地的接地开关。

3.4.10

融冰母线接地开关 **deicing busbar earth switch**

直流融冰系统中,用于融冰母线接地的接地开关。

3.4.11

地线接地开关 **ground-wire earth switch**

直流融冰系统中,用于绝缘地线接地的接地开关。

3.5 直流融冰装置状态

3.5.1

检修状态 **maintenance state**

接地状态 **earthed state**

直流融冰装置换流器与交流侧和直流侧隔离且接地的状态。

3.5.2

冷备用状态 **cold standby state**

隔离状态 **isolated state**

直流融冰装置换流器与交流侧和直流侧隔离,但所有接地开关处于分闸位置的状态。

3.5.3

热备用状态 **hot standby state**

闭锁状态 **block state**

准备投运状态 **ready for operation state**

进线断路器处于合闸位置,直流融冰装置换流器连接到带电的交流母线,融冰母线装置侧隔离开关处于合闸位置,直流侧处于确定的连接方式(开路试验、零功率试验、导线融冰接线、地线融冰接线),直流融冰装置为解锁运行做好准备的状态。

3.5.4

交流侧热备用状态 **AC side hot standby state**

备用状态 **standby state**

准备带电状态 **ready for energization state**

直流融冰装置交流侧隔离开关处于合闸位置,直流侧隔离(融冰母线装置侧隔离开关处于分闸位



置),进线断路器处于分闸位置的状态。

3.5.5

运行状态 **running state**

解锁状态 **deblock state**

融冰回路中建立起稳定直流电流和直流电压的状态。

注:包括带融冰线路运行、开路试验和零功率试验3种状态。

3.6 顺序控制

3.6.1

当前状态 **current state**

在融冰顺序控制操作之前,融冰线路的初始状态。

3.6.2

目标状态 **target state**

融冰顺序控制指令全部执行结束后,融冰线路需要满足的预期状态。

3.6.3

融冰顺序控制 **deicing sequential control**

按照一定时序及联锁逻辑,自动逐条发出、逐条确认被正确执行,直至执行完成全部控制指令,使融冰线路在当前状态与融冰状态间转换的一种系列相关线路融冰操作指令的处理方式。

3.7 试验

3.7.1

开路试验 **open line test**

空载升压试验 **no-load voltage rising test**

直流融冰装置直流侧开路,将输出直流电压升至设定值,用于检查直流融冰装置的直流电压控制功能和电压承受能力的试验。

3.7.2

零功率试验 **zero power test**

短路试验 **short-circuit test**

直流融冰装置直流侧直接或经电抗器短接,将直流电流升至设定值,用于检查直流融冰装置直流电流控制功能及电流承受能力的试验。

3.7.3

等效试验 **equivalent test**

由开路试验和零功率试验组成,用于替代直流融冰装置的带不同长度线路运行试验。

3.7.4

维护试验 **maintenance test**

直流融冰装置投运后,为确保融冰装置融冰功能可用,在每年冰期来临前开展的试验。

3.7.5

现场试验 **on-site test**

在直流融冰装置工程现场完成的试验。

3.7.6

设备试验 **equipment test**

直流融冰装置所有设备安装完成后进行的现场检查和试验。

3.7.7

分系统试验 subsystem test

直流融冰装置一次设备和二次设备连接完成后进行的设备间的现场检查和试验。

3.7.8

系统试验 system test

在直流融冰装置工程现场验证直流融冰装置及与之连接的交流系统相互作用的功能和性能的试验。

4 设计条件**4.1 融冰线路**

直流融冰装置系统设计所需的融冰线路(包括规划线路和需要串联融冰的线路)数据应包括:

- a) 电压等级(kV);
- b) 线路沿线覆冰期气温、风速、覆冰厚度等环境条件;
- c) 不同覆冰区导线和地线配置情况,导线和地线型号、长度(km)、单位长度电容(F/km)等;
- d) 与被融冰线路同塔、平行或交叉跨越线路情况。

4.2 直流融冰装置配置站**4.2.1 环境条件**

环境条件应包括:

- a) 海拔(m);
- b) 最高温度($^{\circ}\text{C}$);
- c) 最低温度($^{\circ}\text{C}$);
- d) 最大相对湿度(%);
- e) 最大覆冰厚度(mm);
- f) 最大风速(m/s);
- g) 地震动峰值加速度(m/s^2);
- h) 污秽等级和等值盐密(mg/cm^2);
- i) 日照强度(W/cm^2)。

4.2.2 系统条件

系统条件应包括:

- a) 系统正常运行电压(kV);
- b) 系统最大持续运行电压(kV);
- c) 电压正常变化范围(kV);
- d) 系统额定频率(Hz);
- e) 频率正常波动范围(Hz);
- f) 系统短路电流(kA);
- g) 系统背景谐波。

4.2.3 电气条件

电气条件应包括:

- a) 变电站主接线；
- b) 主变压器台(组)数和参数；
- c) 站用电系统配置；
- d) 无功补偿装置配置；
- e) 变电站配电装置布置；
- f) 线路高压并联电抗器和串联补偿配置；
- g) 设备和线路保护配置；
- h) 融冰线路对侧站(变电站、换流站或开关站)主接线和配电装置布置。

5 成套设计

5.1 通则

成套设计通则主要包括以下内容。

- a) 直流融冰装置应满足已建线路、规划线路以及需要串联融冰线路的导线和地线融冰和等效试验需求,等效试验应作为交接验收和维护试验的必要项目。
- b) 已建变电站装设电网换相直流融冰装置时,应对原有无功补偿装置配置进行校核。直流融冰装置接入导致电能质量不满足要求时,宜配置滤波装置。
- c) 接入直流融冰装置之前,融冰导线和地线上可能出现的感应电压应低于直流融冰装置直流侧额定电压。

5.2 导线和地线融冰方式

导线和地线融冰方式包括线路停电融冰和线路不停电融冰两种。

交流线路导线融冰应采用线路停电融冰方式,交流线路地线融冰可采用线路停电或线路不停电融冰方式。直流线路地线融冰可采用线路停电融冰或线路不停电融冰方式。

同塔双回交流线路导线融冰宜采用两回线路轮流停电融冰方式,同塔双回交流线路地线融冰宜采用双回线路不停电融冰或单回线路停电融冰方式。同塔双回直流线路地线融冰宜采用双回线路不停电融冰或单回线路停电融冰方式。

交流线路导线融冰宜考虑两相导线串联接入直流融冰装置(即“一相对一相”融冰)和两相导线并联后与另一相导线串联接入直流融冰装置(即“一相对两相”融冰)两种融冰接线方式。

地线融冰宜采用分段方式进行,各分段内地线截面应相同或近似相等。融冰地线可通过停电导线连接到直流融冰装置,或在导线不停电时通过地线融冰引接线接入直流融冰装置。交流线路地线分段不宜大于 50 km,直流线路地线分段不宜大于 100 km。

5.3 主回路参数设计

5.3.1 融冰电流

5.3.1.1 最小融冰电流

导线和地线的融冰电流的经验计算公式见附录 A。常用导线和地线在典型覆冰条件下的融冰电流值见附录 A 的表 A.1~表 A.8。

本文件规定的最小融冰电流计算条件为环境温度 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,风速 5 m/s ,覆冰厚度 10 mm ,覆冰类型为雨淞,融冰时间 1 h 。

5.3.1.2 最大允许融冰电流

导线和地线的最大允许融冰电流计算公式见附录 B,环境条件应取线路无覆冰段工况。常用导线和地线在典型覆冰条件下的最大允许融冰电流值见表 B.1~表 B.8。

5.3.1.3 设计融冰电流

导线和地线的设计融冰电流应大于最小融冰电流,且小于最大允许融冰电流,宜取最小融冰电流的 1.1 倍。

5.3.2 融冰电压

5.3.2.1 交流线路导线和地线融冰

对于各回线路,应按照两相导线串联方式计算流过设计融冰电流时的直流压降,取其最大值作为导线设计融冰电压;应计算各地线段通过设计融冰电流时的直流压降,宜取其最大值作为地线设计融冰电压。应取导线设计融冰电压和地线设计融冰电压二者中的较大值作为交流线路的设计融冰电压。

5.3.2.2 直流线路地线融冰

对于直流线路地线,应计算各地线段通过设计融冰电流时的直流压降,取其最大值作为直流线路地线的设计融冰电压。

5.3.3 直流融冰装置的额定参数

直流融冰装置的额定输出电流、额定输出电压和额定输出功率应根据设计融冰电流和设计融冰电压确定,额定输入电压应根据设计融冰电压和交流侧接入点电压确定,最小运行电流应小于地线的最小融冰电流,且具有 1.1 倍额定输出电流连续运行 2 h 的过载能力。

5.4 接入系统方式



电网换相直流融冰装置交流侧宜通过换流变压器接入系统。

模块化多电平直流融冰装置交流侧可直接接入系统。

5.5 直流融冰装置型式与电气主接线

5.5.1 电网换相直流融冰装置

电网换相直流融冰装置宜采用双桥串联 12 脉动型式,应采用二次绕组相位相差 30°的单台三绕组或两台双绕组换流变压器与交流系统连接,典型接线见附录 C 的图 C.1。也可采用 6 脉动型式,典型接线见图 C.2。特殊情况下,电网换相直流融冰装置换流器也可采用双桥并联或双换流器并联型式,均流因数不应小于 0.9。

5.5.2 模块化多电平直流融冰装置

模块化多电平直流融冰装置可直接与交流系统连接,典型接线见图 C.3。模块化多电平直流融冰装置宜采用单换流器型式,特殊情况下也可采用双换流器并联型式,均流因数不应小于 0.9。

5.5.3 直流融冰装置其他型式

除本文件规定的电网换相直流融冰装置和模块化多电平直流融冰装置外,还存在采用全控型器件的电流源直流融冰装置(典型接线见图 C.4)。

5.5.4 直流融冰装置直流侧接地方式

直流融冰装置直流侧不宜接地。

5.5.5 直流融冰系统电气主接线

直流融冰系统电气主接线包括交流线路导线融冰、交流线路地线融冰和直流线路地线融冰电气主接线。交流线路侧如配置有高压并联电抗器,宜设置隔离开关。

图 C.1、图 C.2、图 C.3 和图 C.4 所示为单回交流线路停电导线或地线融冰电气主接线图。在线路停电后,通过倒闸操作将导线或各地线段分别连接至处于冷备用状态的直流融冰装置进行融冰。同塔双回交流线路两回停电导线和/或地线融冰电气主接线、单回直流线路停电地线融冰电气主接线与此类似。

图 C.5 所示为以电网换相直流融冰装置为例的单回交流线路不停电地线融冰电气主接线图。在线路运行时,通过倒闸操作将地线连接至处于冷备用状态的直流融冰装置进行融冰。单回直流线路不停电地线融冰、同塔双回交流线路不停电地线融冰、同塔双回直流线路不停电地线融冰电气主接线与此类似。

图 C.6 所示为以电网换相直流融冰装置为例的同塔双回交流线路中一回停电导线和地线融冰电气主接线图。在停电一回线路后,通过倒闸操作将导线和各地线段连接至处于冷备用状态的直流融冰装置进行融冰。

图 C.7 所示为以电网换相直流融冰装置为例的同塔双回直流线路中一回停电地线融冰电气主接线图。在停电一回线路后,通过倒闸操作将各地线段连接至处于冷备用状态的直流融冰装置进行融冰。

5.6 融冰回路中的感应电压和感应电流

交流线路运行时,在与其同塔和邻近的导线和地线上产生电容耦合和电磁感应电压。直流线路运行时在与其同塔和邻近的导线和地线上产生电容耦合和空间电荷感应电压。融冰导线和地线接入直流融冰装置形成回路时将产生感应电流。应对同塔运行线路融冰导线和地线接入直流融冰装置、融冰结束后与直流融冰装置隔离过程中融冰回路的感应电压和感应电流进行计算,主要包括:

- a) 交流线路不停电地线融冰;
- b) 直流线路不停电地线融冰;
- c) 交流同塔双回和部分同塔双回线路中一回运行一回停电导线和/或地线融冰;
- d) 直流同塔双回线路中一回运行一回停电地线融冰。

如果感应电压超过直流融冰装置对地额定电压,应采取抑制措施,使之低于直流融冰装置直流侧对地额定电压。对于交流线路不停电地线直流融冰系统中融冰母线上宜配置对地电阻-电容串联电路进行感应电压抑制,直流线路不停电地线直流融冰系统中融冰母线上宜配置对地大电阻进行感应电压抑制。对于同塔双回交流线路中一回停电另一回运行时的直流融冰系统,融冰母线宜配置对地电阻-电容串联电路进行感应电压抑制。对于同塔双回直流线路中一回停电另一回运行时的直流融冰系统,融冰母线宜配置对地大电阻进行感应电压抑制。感应电压抑制电路宜由直流融冰装置供货商提供。如果在接入直流融冰装置前,感应电压峰值低于直流融冰装置直流侧对地额定电压,可不配置感应电压抑制电路。

交流线路电容耦合和电磁感应电压抑制电路宜配置在融冰母线靠直流融冰装置侧,如图 C.5 中 33、图 C.6 中 31,电容值应大于融冰回路中与不停电线路同塔导线段和地线段的对地总电容。直流线路电容耦合和空间电荷感应电压抑制电路宜配置在融冰母线靠近直流融冰装置侧,如图 C.7 中 31,该电阻值应小于融冰回路中与不停电线路同塔导线段的空间电荷等效电阻和地线段绝缘子总电阻。由于交流输电线路上的线路高压并联电抗器应在融冰导线接入直流融冰装置前隔离,直流融冰回路中的

感应电压不宜考虑其影响。

5.7 有融冰需求的地线绝缘设计

5.7.1 通则

有融冰需求的地线应采用绝缘地线,且满足 GB 50545—2010 的要求。新建线路宜在设计中考虑,已建线路应进行绝缘改造。

地线绝缘后宜分段设置接地开关。非覆冰期接地开关宜闭合。

5.7.2 交流线路地线绝缘要求

5.7.2.1 交流线路停电地线绝缘要求

地线保护间隙的工频击穿电压应高于线路运行时的地线感应电压,直流耐压水平应高于最高地线直流融冰运行电压。雷击地线时或出现单相接地故障时,地线保护间隙应可靠击穿。

地线绝缘子的工频击穿电压应高于地线保护间隙的工频击穿电压,直流击穿电压应高于地线保护间隙的直流击穿电压,雷电击穿电压应高于地线保护间隙的雷电击穿电压。

地线绝缘子与并联保护间隙存在污秽或覆冰时,不应在直流融冰电压的作用下击穿。并联保护间隙应先于地线绝缘子击穿。

5.7.2.2 交流线路不停电地线绝缘要求

地线保护间隙的工频击穿电压应高于地线感应电压和直流融冰电压二者中的较大值,直流耐压水平应高于地线直流融冰电压和直流融冰装置解锁后的直流端口感应电压之和。雷击地线时,地线保护间隙应可靠击穿。线路单相接地故障时,保护间隙应可靠击穿。

地线绝缘子的工频击穿电压应高于地线保护间隙的工频击穿电压,直流击穿电压应高于地线保护间隙的直流击穿电压,雷电击穿电压应高于地线保护间隙的雷电击穿电压。

地线绝缘子与并联保护间隙存在污秽或覆冰时,在直流融冰电压和直流融冰装置解锁后的直流端口感应电压共同作用下不应击穿。并联保护间隙应先于地线绝缘子击穿。

5.7.3 直流线路地线绝缘要求

5.7.3.1 直流线路停电地线绝缘要求

地线保护间隙的直流击穿电压应高于地线感应电压,直流耐压水平应高于地线直流融冰电压,雷击地线时,地线保护间隙应可靠击穿。

地线绝缘子的直流击穿电压应高于地线保护间隙的直流击穿电压,雷电击穿电压应高于地线保护间隙的雷电击穿电压。

地线绝缘子与并联保护间隙存在污秽或覆冰时,不应在直流融冰电压的作用下击穿。并联保护间隙应先于地线绝缘子击穿。

5.7.3.2 直流线路不停电地线绝缘要求



地线保护间隙的直流击穿电压应高于地线感应电压,直流耐压水平应高于地线直流融冰电压和直流融冰装置解锁后的直流端口感应电压之和,雷击地线时,地线保护间隙应可靠击穿。

地线绝缘子的直流击穿电压应高于地线保护间隙的直流击穿电压,雷电击穿电压应高于地线保护间隙的雷电击穿电压。

地线绝缘子与并联保护间隙存在污秽或覆冰时,在直流融冰电压和直流融冰装置解锁后的直流端

口感应电压共同作用下不应击穿。并联保护间隙应先于地线绝缘子击穿。

5.7.4 地线绝缘设计

绝缘架空地线应通过绝缘子与杆塔连接。耐张绝缘子串、悬垂绝缘子串宜采用双联设计,绝缘子应带保护间隙,间隙值宜为 60 mm~100 mm,具体值应根据工程设计计算并经相关试验确定。

绝缘架空地线各分段内应电气连通,地线融冰分段点应设置在耐张塔。非融冰分段点耐张塔两侧地线应加装跳线以保持电气连接,耐张线夹可采用液压式或预绞式。采用液压式应配置引流板进行引流线安装。引流线应采用支柱绝缘子固定,宜设置地线接地开关。融冰分段点耐张塔两侧地线不连接。

对于光纤复合架空地线(OPGW),非融冰分段点耐张塔两侧电气和光缆均应连通,应保证电流及光纤信号可靠传输。引流线应采用支柱绝缘子固定。光缆接头盒及余缆架应通过支柱绝缘子与铁塔绝缘。融冰分段点耐张塔两侧应配置光电分离接头盒,在保证光纤信号可靠传导的同时开断电气连接。光电分离接头盒两侧应分别配置余缆架。

绝缘地线连接及绝缘子与金具见附录 D。

5.8 直流融冰装置的过电压保护和绝缘配合

5.8.1 直流融冰装置的过电压保护

直流融冰装置过电压保护应符合 GB/T 311.1、GB/T 311.2、GB/T 311.3 及 GB/T 50064 的相关规定。

5.8.2 直流融冰装置的绝缘配合

所有设备的绝缘配合应符合 GB/T 311.1、GB/T 311.2 和 GB/T 311.3 的相关规定,不仅考虑直流融冰装置自身的正常和故障工况,还需考虑电网的影响,主要包括:

- 直流融冰装置换流器故障;
- 直流融冰装置直流侧故障(包括融冰线路故障);
- 直流融冰装置交流侧故障;
- 直流融冰装置控制系统误操作或故障;
- 与融冰导线和地线同塔、平行和交叉跨越线路正常运行和故障引起的感应电压;
- 直流融冰系统谐振过电压、雷击融冰线路引起的雷电侵入波过电压和融冰线路断线引起的操作过电压;
- 直流融冰装置交流侧的过电压。

直流融冰装置直流侧的绝缘水平应根据直流侧额定运行电压、融冰导线和地线接入后直流融冰装置解锁前后可能出现的交直流感应电压的综合水平确定。宜对接入融冰导线和地线后直流融冰系统中可能出现的最大交直流感应电压进行考虑,包括同塔双回交流线路中一回运行一回停电导线或地线融冰、交流线路导线不停电地线融冰、直流线路导线不停电地线融冰、同塔双回直流线路中一回运行一回停电地线融冰等工况。直流侧设备绝缘水平宜根据计算的绝缘水平向上取标准交流电压等级,如 10 kV、35 kV 和 66 kV。

5.8.3 直流融冰装置的过电压保护配置

5.8.3.1 直流融冰装置的过电压保护配置原则

直流融冰装置的过电压保护配置原则主要包括:

- 直流融冰系统过电压防护设备宜采用金属氧化物避雷器和保护间隙;
- 金属氧化物避雷器的主要功能为防护直流融冰装置操作过电压,交流侧产生的过电压应由交

流侧避雷器加以限制,换流器产生的过电压应由直流侧避雷器加以限制;

- 保护间隙主要防护直流融冰系统谐振过电压、雷击融冰线路引起的雷电侵入波过电压和融冰线路断线引起的操作过电压;
- 对于融冰回路中的交流感应电压峰值超过直流融冰装置对地额定电压(交流线路导线不停电地线融冰、交流同塔双回线路中一回运行一回停电导线和地线融冰)的工况,应配置对地电阻-电容串联电路进行抑制;
- 对于融冰回路中的直流感应电压(直流线路导线不停电地线融冰、同塔双回直流线路中一回运行一回停电地线融冰)的工况,应配置感应电压抑制电路进行限制。

5.8.3.2 直流融冰装置的过电压保护配置

直流融冰装置典型的过电压保护配置见图 C.1~图 C.7。

交流进线避雷器按照 GB/T 11032—2020 的附录 D 推荐的对应交流电压等级避雷器参数选取。

直流极母线避雷器、融冰母线避雷器额定电压的选取应满足避雷器安装位置的最高持续运行电压(包括换流器运行过程中可能出现的换相过冲)的要求,还应满足对同塔和邻近线路运行引起的感应电压的要求。额定电压按照 GB/T 11032—2020 的附录 D 选取。

抑制交流线路感应电压的电阻-电容串联电路和抑制直流线路感应电压的大电阻宜安装在融冰母线上,且靠近融冰母线线路装置侧隔离开关。无融冰母线时,应安装在直流融冰装置正负极母线上。

保护间隙宜安装在融冰母线上,且靠近融冰母线装置侧隔离开关,间隙长度宜按照避雷器的操作冲击保护水平的 0.9 倍和雷电冲击保护水平的 0.9 倍对应的间隙计算值二者中的较小值选取。间隙长度的近似计算方法按照 GB/T 311.2。

5.8.4 其他过电压保护措施

其他过电压保护措施主要包括:

- 电网换相换流器应配备保护性触发功能;
- 模块化多电平换流器应配备保护性闭锁功能。



5.9 直流融冰装置与线路的连接

5.9.1 通则

融冰线路接入直流融冰装置宜采用隔离开关。站内融冰隔离开关和融冰接地开关的型式和结构见附录 E 中的 E.1,站外融冰隔离开关和融冰接地开关的型式和结构见 E.2。

对于覆冰输电线路数量少且出现覆冰概率较低的变电站,可采用临时接线方案(见 E.3)接入直流融冰装置。

5.9.2 融冰隔离开关

5.9.2.1 融冰母线装置侧隔离开关

融冰母线装置侧隔离开关用于直流融冰装置与融冰母线的连接。融冰母线与融冰母线装置侧隔离开关的连接见 E.1.1。

5.9.2.2 融冰母线线路侧隔离开关

融冰母线线路侧隔离开关用于融冰母线和融冰线路的连接。线路处于冷备用状态即可进行融冰母线线路侧隔离开关的开断和关合。融冰母线与融冰母线线路侧隔离开关的连接见 E.1.2。

5.9.2.3 导线短接隔离开关

导线短接隔离开关用于融冰线路三相导线末端三相或两相的短接。常见的型式见 E.1.3。

5.9.2.4 导线和地线联络隔离开关

导线和地线联络隔离开关用于线路停电地线融冰时各地线段与导线的连接,通常安装在铁塔上。常见的型式见 E.2.1。

5.9.2.5 地线和引接线联络隔离开关

地线和引接线联络隔离开关用于线路不停电地线融冰时地线与地线融冰引接线的连接,通常安装在铁塔上。常见的型式见 E.2.2。

5.9.2.6 地线短接隔离开关

地线短接隔离开关用于两平行地线段一端的短接。常见的型式见 E.2.3。

5.9.3 融冰母线

对融冰母线的要求如下。

- a) 融冰母线宜选用满足最大融冰电流的管形铝合金导体。布置型式宜采用水平布置,在场地受限时亦可采用垂直布置。
- b) 用于交流导线和地线融冰的融冰母线宜采用 3 根。仅用于直流线路地线、接地极线路及交流线路地线融冰的融冰母线宜采用 2 根。

5.9.4 地线融冰引接线

对地线融冰引接线的要求如下:

- a) 地线融冰引接线截面不宜小于需融冰地线截面的 2 倍;
- b) 地线融冰引接线如果采用架空线形式,应按照架空输电线路进行设计。

6 功能和性能要求

6.1 直流融冰装置正常使用条件

6.1.1 温度

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

6.1.2 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% 。

6.1.3 覆冰厚度

覆冰厚度不超过 20 mm 。

6.1.4 污秽

污秽等级为 d 级。



6.1.5 海拔

海拔不超过 1 000 m。当海拔超过 1 000 m 时,应进行海拔修正。

6.1.6 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,应在户外配电装置的设计中采取措施,并对制造商提出针对风速的特殊要求。

6.1.7 地震烈度

与安装站点(变电站或换流站)中变电设备的地震烈度要求相同。

6.1.8 日照强度

日照强度不超过 0.1 W/cm^2 。在一定的阳光辐射条件下,为不超过规定的温升,采取加盖屋顶、强迫通风,降低或减弱阳光的聚集等适当的措施。

6.2 电网换相直流融冰装置

6.2.1 通则

电网换相直流融冰装置一般采用附录 F 中 F.1.1 的设计流程进行系统设计。F.1.2 给出了电网换相直流融冰装置主回路参数设计方法及示例,F.1.3 给出了电网换相直流融冰装置绝缘配合设计方法及示例,F.1.4 给出了电网换相直流融冰装置设备耐受电流设计方法及示例。

电网换相直流融冰装置应满足如下要求:

- a) 在 GB/T 15945 允许的电网频率下持续运行;
- b) 在接入点交流额定电压的 0.8 倍~1.2 倍下持续运行;
- c) 在 GB/T 15543 允许的电网三相电压不平衡条件下持续运行;
- d) 在正常运行条件下注入系统公共连接点(PCC)的谐波满足 GB/T 14549 的要求;
- e) 耐受系统规定的暂态过电压要求;
- f) 接入系统不引起谐振;
- g) 直流融冰回路不出现谐振;
- h) 换流器能在 90° 触发角运行,配置适当的平波电抗器使输出电流不断续,最小运行电流满足地线融冰要求;
- i) 可兼有静止无功补偿装置功能,即在非融冰时转换为晶闸管控制电抗器(TCR)或转换为晶闸管投切电抗器(TSR)运行。

6.2.2 控制功能要求

电网换相直流融冰装置的控制功能应满足以下要求:

- a) 电网换相直流融冰装置具备直流输出电流连续调节功能,输出电流的偏差在目标设定值的 $\pm 5\%$ 以内;
- b) 能按预定的程序完成电网换相直流融冰装置的启动和停止,能实现直流侧隔离开关的自动操作以完成融冰接线方式的选择,出现故障时能紧急停运设备;
- c) 控制保护装置具备电网换相直流融冰装置开路试验和零功率试验功能,也即等效试验功能;
- d) 电网换相直流融冰装置的电流阶跃响应时间小于 100 ms,超调量小于 30%;
- e) 电网换相直流融冰装置能适应预定的各条线路融冰要求,采用分层分布式控制结构,实现微机

监视和控制功能；

- f) 电网换相直流融冰装置具备友好的人机界面,便于操作及维护；
- g) 电网换相直流融冰装置具备事件记录及故障录波功能,故障录波可远程调取、离线分析；
- h) 电网换相直流融冰装置具备远方监控功能；
- i) 电网换相直流融冰装置运行监控信息接入变电站监控系统,并能在主控室实现融冰操作。

6.2.3 故障类型及保护功能要求

6.2.3.1 故障类型和保护配置

电网换相直流融冰装置的故障类型包括:交流过电流、交流欠电压、换流变阀侧相间短路、阀短路、阀区接地、控制触发脉冲丢失、桥间电流不平衡、直流过电流、直流欠电压、直流过电压、融冰线路断线、融冰线路接地等。

电网换相直流融冰装置的保护可分为交流保护区、换流变压器保护区、换流器保护区和直流保护区。

电网换相直流融冰系统的典型保护配置见附录 G 的 G.1。

6.2.3.2 保护功能要求

电网换相直流融冰装置的保护功能主要包括：

- a) 电网换相直流融冰装置中所有主设备应装设保护装置,且各保护装置之间相互配合；
- b) 保护装置性能应符合电网换相直流融冰装置安全可靠运行的要求,满足可靠性、选择性、灵敏性和快速性的要求,保护定值、时序的选择应与上级保护配合,防止越级动作；
- c) 电网换相直流融冰装置的交流进线断路器不应设置自动重合闸功能。

6.2.4 性能要求

6.2.4.1 谐波性能

在电网换相直流融冰装置运行范围内、系统谐波阻抗圆内和系统背景谐波影响下,电网换相直流融冰装置在其与输电公共连接点造成的谐波畸变水平不应影响装置自身和接入系统的安全。

注入系统公共连接点(PCC)的谐波应符合 GB/T 14549 的相关规定。

6.2.4.2 损耗

电网换相直流融冰装置的损耗保证值应基于计算值,在额定运行工况下,总损耗不超过电网换相直流融冰装置额定输出容量的 1%。

6.2.4.3 可听噪声

电网换相直流融冰装置的结构设计宜考虑限制噪声干扰。

电网换相直流融冰装置对外噪声的限制范围以变电站或换流站的围护栏为限。

电网换相直流融冰装置站内噪声的限制应满足 GB 12348—2008 中第 4 章的要求,测量按照 GB 12348—2008 中第 5 章规定的测量方法进行。

电网换相直流融冰装置噪声对周围的影响应符合 GB 12348—2008 和 GB 3096 的相关规定。

6.2.4.4 无线电干扰

电网换相直流融冰装置产生的无线电干扰不应影响装置自身和接入系统的正常运行。

6.2.5 主要设备技术要求

6.2.5.1 电网换相换流器

电网换相换流器的额定直流功率、额定直流电压和额定直流电流分别不应小于电网换相直流融冰装置的额定输出功率、额定输出电压和额定输出电流,网侧额定电压对应电网换相直流融冰装置额定输入电压,具体技术要求应符合 GB/T 31487.2—2025 的相关规定。

6.2.5.2 换流变压器

对换流变压器的技术要求如下:

- a) 宜采用三相变压器,宜具有 1.1 倍额定输出电流连续运行 2 h 的过载能力;
- b) 考虑电网换相换流器产生谐波对变压器的影响,额定电流不应小于电网换相直流融冰装置额定直流电流对应基波电流的 1.1 倍,容量不小于电网换相直流融冰装置额定容量对应基波容量的 1.1 倍;
- c) 考虑过电压运行、输入电压谐波电流和直流电压分量的影响,磁通密度的设计与常规变压器相比应留有更多裕度,1.1 倍额定电压下铁芯不应出现饱和;
- d) 换流变压器最大相间阻抗偏差应小于 $\pm 2\%$ 。

6.2.5.3 平波电抗器

技术要求应符合 GB/T 1094.6—2011 的相关规定,GB/T 1094.6—2011 的 12.1 中“a)工业用:直流中通常叠加有大量的谐波分量,这类平波电抗器一般为户内用且直流系统电压通常不高于 10 kV”的“10 kV”改为“25 kV”。

6.2.5.4 直流测量装置

直流测量装置包括直流电压测量装置和直流电流测量装置,技术要求如下:

- a) 直流分压器应符合 GB/T 26217 的相关规定;
- b) 直流电流测量装置应符合 GB/T 26216.1 的相关规定;
- c) 直流电压测量装置和直流电流测量装置应具有良好的暂态响应和频率响应特性,并满足电网换相直流融冰装置控制保护系统的测量精度要求。

6.2.5.5 控制保护装置

对控制保护装置的技术要求如下。

- a) 控制保护装置应保证电网换相直流融冰装置能适应预定的各线路导线和地线融冰,能满足所有预定线路导线和地线的融冰要求。
- b) 控制保护装置应具备对各信号的测量和监视功能,事件记录和故障录波功能。
- c) 控制保护装置能按预定的程序完成电网换相直流融冰装置的启动和停止,调节电网换相直流融冰装置的直流电流输出,完成融冰方式的选择,实现融冰隔离开关和接地开关的自动操作等。保证线路各相导线和地线快速、可靠和安全融冰,并保护电网换相直流融冰装置自身不受故障损坏,不使事故范围扩大。
- d) 可满足融冰顺序控制要求,融冰顺序控制的当前状态为融冰线路任一状态,目标状态是导线或地线融冰。
- e) 控制保护装置能在就地或在主控室对电网换相直流融冰装置进行监视和控制,并可通过通信接口与站内其他监控设备和上级监控设备(或调度中心)保持信息传递。

- f) 控制保护装置宜进行冗余配置,满足控制保护系统中任一套控制保护系统故障,均不应影响电网换相直流融冰功能。

6.2.5.6 交流侧滤波器

对交流侧滤波器的技术要求如下:

- a) 交流侧滤波器主要用于滤除电网换相直流融冰装置交流侧特征谐波,同时用于补偿电网换相直流融冰装置消耗的无功功率,无功补偿容量宜按照电网换相直流融冰装置零功率运行消耗的无功进行配置;
- b) 应根据系统分析的结果确定交流滤波器的配置,也可考虑站内无功补偿装置改造;
- c) 交流侧滤波器可采用单调谐滤波器、高通滤波器、双调谐或者三调谐滤波器,分组容量应与接入电压等级无功补偿装置容量相同,结构型式应满足系统接入点谐波性能要求,且不引起谐振;
- d) 电抗器的技术要求符合 GB/T 1094.6 的相关规定;
- e) 电容器的技术要求符合 GB/T 11024.1 和 GB/T 20994 的相关规定。

6.2.5.7 直流侧隔离开关和换流器交流侧隔离开关

包括融冰母线装置侧隔离开关、融冰母线线路侧隔离开关、导线短接隔离开关、导线和地线联络隔离开关、地线和引接线联络隔离开关、地线短接隔离开关和换流器交流侧隔离开关,技术要求如下:

- a) 应满足电网换相直流融冰装置最大输出直流电流和电压的要求;
- b) 融冰母线线路侧隔离开关可采用分级绝缘,静触头对地及对动触头绝缘水平与融冰线路绝缘等级相同,动触头对地绝缘水平与电网换相直流融冰装置直流侧绝缘等级相同;
- c) 融冰母线装置侧隔离开关应具有一定的小电流开断能力,宜考虑感应电压抑制电路和融冰操作顺序的影响,交流同塔双回线路中一回运行一回停电导线融冰,在两相导线两端短接时回路中有感应电流,融冰导线相序切换时融冰母线装置侧隔离开关需要开合感应电流,其数值根据系统设计方案确定;
- d) 在覆冰条件下能操作的额定覆冰厚度不宜小于 20 mm;
- e) 应满足融冰顺序控制要求;
- f) 其他要求应符合 GB/T 1985—2023 和 GB/T 11022 的相关规定。

6.2.5.8 直流侧接地开关和换流器交流侧接地开关

包括换流器直流侧接地开关、直流极母线接地开关、融冰母线接地开关、地线接地开关和换流器交流侧接地开关,技术要求如下。

- a) 应满足电网换相直流融冰装置最高输出直流电压和故障电流最大峰值的要求,短时耐受电流的额定持续时间不应小于 2 s。
- b) 采用交流接地开关代替直流侧接地开关时,其标称额定电压的方均根值不应小于额定直流电压值。
- c) 融冰母线接地开关宜在融冰母线首尾各配置一台。
- d) 融冰母线接地开关、地线接地开关应具有感应电流关合能力,宜考虑感应电压抑制电路和融冰操作顺序的影响,额定感应电流和电压要求应根据相应工况计算确定,且不应低于:
 - 电磁耦合额定感应电流方均根值:100 A;
 - 电磁耦合额定感应电压方均根值:4 kV;
 - 静电耦合额定感应电流方均根值:2 A;
 - 静电耦合额定感应电压方均根值:6 kV。

- e) 应满足融冰顺序控制要求。
- f) 在覆冰条件下能操作的额定覆冰厚度不宜小于 20 mm。
- g) 其他要求应符合 GB/T 1985—2023 和 GB/T 11022 的相关规定。

6.2.5.9 直流侧避雷器

包括直流极母线避雷器、融冰母线避雷器,技术要求如下:

- a) 应选用无间隙金属氧化物避雷器;
- b) 避雷器技术要求应符合 GB/T 11032—2020 的规定;
- c) 避雷器参数可参照 5.8.3.2 计算,并按照 GB/T 11032—2020 中附录 D 选取对应电压等级的交流避雷器。

6.2.5.10 直流侧保护间隙

对直流侧保护间隙的技术要求如下:

- a) 宜采用棒形保护间隙;
- b) 空气间隙操作冲击 50%放电电压选取为 90%的融冰母线避雷器的操作冲击保护水平;
- c) 空气间隙雷电冲击 50%放电电压选取为 90%的融冰母线避雷器的雷电冲击保护水平。

6.2.5.11 其他设备

对其他设备的技术要求如下:

- a) 交流断路器的技术要求按照 GB/T 11022 和 GB/T 1984 的规定执行,应选用 SF₆ 断路器或真空断路器;
- b) 交流隔离(接地)开关的技术要求应符合 GB/T 11022 和 GB/T 1985—2023 的相关规定;
- c) 电流互感器、电压互感器的技术要求应符合 GB/T 20840.1、GB/T 20840.2、GB/T 20840.3 的相关规定;
- d) 交流避雷器的技术要求应符合 GB/T 11032—2020 的相关规定;
- e) 绝缘子、套管、电缆、照明设施、采暖通风设施和图像监视等设备的技术要求按照相应国家标准执行。

6.3 模块化多电平直流融冰装置

6.3.1 通则

模块化多电平直流融冰装置一般采用 F.2.1 中的设计流程进行系统设计。F.2.2 给出了模块化多电平直流融冰装置主回路参数设计方法及示例,F.2.3 给出了模块化多电平直流融冰装置绝缘配合设计方法及示例,F.2.4 给出了模块化多电平直流融冰装置设备耐受电流设计方法及示例。

模块化多电平直流融冰装置应满足 6.2.1 中 a)~g) 的要求,不融冰时宜作为静止同步补偿装置运行。

6.3.2 控制功能要求

模块化多电平直流融冰装置的控制功能应满足以下要求:

- a) 模块化多电平直流融冰装置具备直流输出电流连续调节功能,输出电流的偏差在目标设定值的±5%以内;
- b) 能按预定的程序完成模块化多电平直流融冰装置的启动和停止,能实现直流侧隔离开关的自

动操作以完成融冰接线方式的选择,出现故障时能紧急停运设备;

- c) 模块化多电平直流融冰装置的电流阶跃响应时间小于 30 ms,超调量小于 30%;
- d) 模块化多电平直流融冰装置能适应预定的各条线路融冰要求,采用分层分布式控制结构,实现微机监视和控制功能;
- e) 模块化多电平直流融冰装置具备友好的人机界面,便于操作及维护;
- f) 模块化多电平直流融冰装置具备事件记录及故障录波功能,故障录波可远程调取、离线分析;
- g) 模块化多电平直流融冰装置具备远方监控功能;
- h) 模块化多电平直流融冰装置运行监控信息接入变电站监控系统,并能在主控室实现融冰操作;
- i) 模块化多电平直流融冰装置具备在接入点额定电压 0.1 p.u.~1.2 p.u.下的无功补偿能力。

6.3.3 故障类型及保护功能要求

6.3.3.1 故障类型和保护配置

模块化多电平直流融冰装置的故障类型主要包括:过负荷保护、桥臂过电流保护、交流过电压、交流欠电压、子模块冗余不足、子模块旁路开关拒动、子模块过电压、子模块过温、直流过电流、直流欠电压、直流过电压、融冰线路断线、融冰线路接地等。

模块化多电平直流融冰装置保护可分为交流保护区、换流器保护区和直流保护区。

模块化多电平直流融冰系统的典型保护配置见 G.2。

6.3.3.2 保护功能要求

模块化多电平直流融冰装置保护功能要求按照 6.2.3.2 执行。

6.3.4 性能要求

6.3.4.1 谐波性能

模块化多电平直流融冰装置的谐波性能要求按照 6.2.4.1 执行。

6.3.4.2 损耗

模块化多电平直流融冰装置的损耗保证值应基于计算值。在额定运行工况下,总损耗不应超过模块化多电平直流融冰装置额定输出容量的 1.2%。

6.3.4.3 可听噪声

模块化多电平直流融冰装置的可听噪声要求按照 6.2.4.3 执行。

6.3.4.4 无线电干扰

模块化多电平直流融冰装置的无线电干扰要求按照 6.2.4.4 执行。

6.3.5 主要设备技术要求

6.3.5.1 模块化多电平换流器

模块化多电平换流器的额定直流功率、额定直流电压和额定直流电流分别不应小于模块化多电平直流融冰装置的额定输出功率、额定输出电压和额定输出电流,网侧额定电压对应模块化多电平直流融

冰装置的额定输入电压,具体技术要求应符合 GB/T 31487.2—2025 的相关规定。

6.3.5.2 启动电阻器

启动电阻器应符合 GB/T 36955 的相关规定。

6.3.5.3 直流测量装置

直流测量装置的技术要求按照 6.2.5.4 执行。

6.3.5.4 控制保护装置

控制保护装置的技术要求按照 6.2.5.5 执行。

6.3.5.5 直流侧隔离开关和换流器交流侧隔离开关

直流侧隔离开关和换流器交流侧隔离开关的技术要求按照 6.2.5.7 执行。

6.3.5.6 直流侧接地开关和换流器交流侧接地开关

直流侧接地开关和换流器交流侧接地开关的技术要求按照 6.2.5.8 执行。

6.3.5.7 直流侧避雷器

直流侧避雷器的技术要求按照 6.2.5.9 执行。

6.3.5.8 直流侧保护间隙

直流侧保护间隙的技术要求按照 6.2.5.10 执行。

6.3.5.9 其他设备

其他设备的技术要求按照 6.2.5.11 执行。

7 检验规则

7.1 总则

直流融冰装置的试验分为型式试验、例行试验、现场试验和维护试验。

型式试验的目的是验证直流融冰装置的设计能否满足技术规范要求。型式试验宜在具备资质的实验室进行,且通常应按照一定比例只对部分试品进行。

例行试验的目的是检验设备是否应按照要求制造,证明制造的正确性,试验对象包括直流融冰装置的所有设备。例行试验宜在设备制造厂进行。

现场试验的目的是检验直流融冰装置是否具备投运条件,分为设备试验、分系统试验和系统试验,在工程现场进行。设备试验检验设备的安装质量、性能和可靠性,在直流融冰装置的所有设备运抵工程现场并安装完成后开展。分系统试验检验设备间连接是否正确、信号传递是否正常,在一次设备和二次设备连接完成后开展。系统试验检验直流融冰装置是否具备投运条件,在直流融冰装置正式投运前开展,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。

维护试验检验直流融冰装置的融冰功能,在每年冰期来临前开展。

7.2 型式试验和例行试验

7.2.1 电网换相直流融冰装置

7.2.1.1 电网换相换流器

电网换相换流器的型式试验和例行试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 31487.2—2025 的 6.2 和 6.5 执行,试验结果应符合 6.2.5.1 的要求。

7.2.1.2 换流变压器

换流变压器的型式试验和例行试验项目、试验方法和验收准则按照表 1 执行。

表 1 换流变压器的型式试验和例行试验

序号	试验项目	试验类型		试验方法和验收准则
		型式试验	例行试验	
1	绕组电阻测量	—	√	按照 GB/T 1094.1—2013 的 11.2 进行
2	电压比测量和联结组标号检定	—	√	按照 GB/T 1094.1—2013 的 11.3 进行
3	短路阻抗和负载损耗测量	—	√	按照 GB/T 1094.1—2013 的 11.4 进行
4	空载损耗和空载电流测量	—	√	按照 GB/T 1094.1—2013 的 11.5 进行
5	绝缘油中溶解气体测量	—	√	按照 GB/T 17623 进行
6	绕组对地及绕组间直流绝缘电阻测量	—	√	按照 JB/T 501—2021 的 3.9 进行
7	绝缘型式试验	√	—	按照 GB/T 1094.3—2017 的第 7 章进行
8	绝缘例行试验	—	√	按照 GB/T 1094.3—2017 的第 7 章进行
9	温升试验	√	—	按照 GB/T 1094.2—2013 的第 7 章进行
10	声级测定	√	—	按照 GB/T 1094.10—2022 的第 11 章进行
11	直流耐压试验	√	√	按照 GB/T 18494.2—2022 的 9.6 进行
注：“√”表示开展;“—”表示不开展。				

试验结果应符合 6.2.5.2 的要求。

7.2.1.3 平波电抗器

平波电抗器的型式试验和例行试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 1094.6—2011 的 12.8 的要求进行,试验结果应符合 6.2.5.3 的要求。

7.2.1.4 直流电压测量装置

直流电压测量装置的型式试验和例行试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 26217 的要求进行,其中额定一次电压选取与直流融冰装置额定输出电压相同或者高一等级电压。试验结果应符合 6.2.5.4 的要求。



7.2.1.5 直流电流测量装置

直流电流测量装置型式试验和例行试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 26216.1 的要求进行,其中额定一次电压选与直流融冰装置额定输出电压相同或者高一级电压,额定一次直流电流选与直流融冰装置额定输出电流相同或者大一级电流。试验结果应符合 6.2.5.4 中的要求。

7.2.1.6 控制保护装置

控制保护装置本体的基本参数试验、数字化接口试验、功率消耗试验、温升试验、环境试验、电源影响试验、机械性能试验、绝缘性能试验、电磁兼容试验、过载试验、触点性能和机械寿命试验、安全试验、通信及规约测试等试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 7261 执行,功能和性能试验、连续通电试验项目按照表 2 执行。

表 2 控制保护装置的型式试验和例行试验

序号	试验项目		试验类型		试验方法和验收准则
			型式试验	例行试验	
1	功能和性能试验	换流器带电试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.2.1.2 进行
2		跳闸试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.2.1.3 进行
3		开路试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.2.1.4 进行
4		启停试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.2.1.5 进行
5		冗余切换试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.2.1.6 进行
6		电流升降试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.2.1.7 进行
7		电流阶跃试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.2.1.8 进行
8		额定电流试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.2.1.9 进行
9		静止无功补偿功能试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.2.1.10 进行
10	连续通电试验		—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.1.2.2 进行
注：“√”表示开展；“—”表示不开展。					

试验结果应符合 6.2.5.5 的要求。

7.2.1.7 交流滤波器

交流滤波器用电容器的型式试验和例行试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 11024.1 的要求进行。

交流滤波器用电抗器的型式试验和例行试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 1094.6—2011 的 9.10 的要求进行。

交流滤波器用电阻器型式试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 30547—2023 中第 7 章的要求进行例行试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 30547—2023 中第 8 章的要求进行。

试验结果应符合 6.2.5.6 的要求。

7.2.1.8 直流侧隔离开关和换流器交流侧隔离开关

融冰母线装置侧隔离开关、融冰母线线路侧隔离开关、导线短接隔离开关、导线和地线联络隔离开

关、地线引接线联络隔离开关和地线短接隔离开关型式试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 1985—2023 中第 7 章的要求进行,融冰母线装置侧隔离开关需感应电流开合能力试验采用 GB/T 1985—2023 的第 7 章中“适用于 $U_r \geq 40.5$ kV 的隔离开关”相关条款,例行试验项目、试验方法和按照 GB/T 1985—2023 中第 8 章的要求进行,试验结果应符合 6.2.5.7 的要求。

7.2.1.9 直流侧接地开关和换流器交流侧接地开关

换流器直流侧接地开关、直流极母线接地开关、融冰母线接地开关、地线接地开关和换流器交流侧接地开关型式试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 1985—2023 中第 7 章的要求进行。融冰母线接地开关、地线接地开关的感应电流关合能力试验采用 GB/T 1985—2023 中第 7 章“适用于 $U_r \geq 40.5$ kV 的接地开关”相关条款,例行试验项目、试验方法和验收标准按照 GB/T 1985—2023 第 8 章中的要求进行,试验结果应符合 6.2.5.8 中的要求。

7.2.1.10 直流侧避雷器

直流极母线避雷器和融冰母线避雷器型式试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 11032—2020 第 8 章的要求进行,例行试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 11032—2020 中 9.1 的要求进行,试验结果应符合 6.2.5.9 的要求。

7.2.2 模块化多电平直流融冰装置

7.2.2.1 模块化多电平换流器

模块化多电平换流器的型式试验和例行试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 31487.2—2025 的 6.3、6.4 和 6.5 执行,试验结果应符合 6.3.5.1 的要求。

7.2.2.2 启动电阻器

启动电阻器的型式试验和例行试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 36955 的要求进行,试验结果应符合 6.3.5.2 的要求。

7.2.2.3 直流电压测量装置

直流电压测量装置的型式试验和例行试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 26217 的要求进行,试验结果应符合 6.3.5.3 中的要求。

7.2.2.4 直流电流测量装置

直流电流测量装置的型式试验和例行试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 26216.1 的要求进行,试验结果应符合 6.3.5.3 中的要求。

7.2.2.5 控制保护装置

控制保护装置本体的基本参数试验、数字化接口试验、功率消耗试验、温升试验、环境试验、电源影响试验、机械性能试验、绝缘性能试验、电磁兼容试验、过载试验、触点性能和机械寿命试验、安全试验、通信及规约测试等试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 7261 执行,功能和性能试验、连续通电试验项目按照表 3 执行。

表 3 控制保护装置的型式试验和例行试验

序号	试验项目		试验类型		试验方法和验收准则
			型式试验	例行试验	
1	功能和性能试验	换流器带电试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.2.1.2 进行
2		跳闸试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.2.1.3 进行
3		开路试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.2.1.4 进行
4		启停试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.2.1.5 进行
5		冗余切换试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.2.1.6 进行
6		子模块冗余试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.2.1.7 进行
7		电流升降试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.2.1.8 进行
8		电流阶跃试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.2.1.9 进行
9		额定电流试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.2.1.10 进行
10		静止同步补偿功能试验	—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.2.1.11 进行
11	连续通电试验		—	√	按照 GB/T 31487.3—2025 的 4.2.2.2 进行
注：“√”表示开展；“—”表示不开展。					

试验结果应符合 6.3.5.4 的要求。

7.2.2.6 直流侧隔离开关和换流器交流侧隔离开关

按照 7.2.1.8 的要求进行。

7.2.2.7 直流侧接地开关和换流器交流侧接地开关

按照 7.2.1.9 的要求进行。

7.2.2.8 直流侧避雷器

按照 7.2.1.10 的要求进行。

7.3 现场试验

7.3.1 设备试验

7.3.1.1 电网换相直流融冰装置

7.3.1.1.1 电网换相换流器

电网换相换流器的现场试验试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 31487.3—2025 的 6.2 和 6.5 执行。

7.3.1.1.2 换流变压器

换流变压器的现场试验项目、试验方法和验收准则按照 GB 50150 的要求进行。

7.3.1.1.3 直流电压测量装置

直流电压测量装置的现场试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 26217 的要求进行。

7.3.1.1.4 直流电流测量装置

直流电流测量装置的现场试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 26216.1 的要求进行。

7.3.1.1.5 控制保护装置

控制保护装置的现场试验项目和试验方法按照表 4 执行。

表 4 控制保护装置的现场试验

序号	试验项目	试验方法
1	电源检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.2.1 进行
2	互感器接口试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.2.2 进行
3	阀触发和监测接口试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.2.3 进行
4	控制保护功能接口试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.2.4 进行
5	监控系统接口试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.2.5 进行
6	故障录波接口试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.2.6 进行
7	其他通信接口试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.2.7 进行
8	整定值检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.2.8 进行
9	其他二次回路	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.1.2.9 进行

试验后,控制保护装置的电源应工作正常,各接口能正常传输电气和开关量等信号,整定值应与设计值一致。

7.3.1.1.6 平波电抗器

换流变压器的现场试验项目、试验方法和验收准则按照 GB 50150 的要求进行。

7.3.1.1.7 交流滤波器

交流滤波器用电容器和电抗的现场试验项目、试验方法和验收准则按照 GB 50150 的要求进行。

交流滤波器用电阻器现场试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 30547—2023 的要求进行。

7.3.1.2 模块化多电平直流融冰装置

7.3.1.2.1 模块化多电平换流器

模块化多电平换流器的现场试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 31487.2—2025 的 6.3、6.4 和 6.5 的要求执行。

7.3.1.2.2 直流电压测量装置

直流电压测量装置的现场试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 26217 的要求进行。

7.3.1.2.3 直流电流测量装置

直流电流测量装置的现场试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 26216.1 的要求进行。

7.3.1.2.4 控制保护装置

控制保护装置的现场试验项目和试验方法按照表 5 执行。

表 5 控制保护装置的现场试验

序号	试验项目	试验方法
1	电源检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.2.1 进行
2	互感器接口试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.2.2 进行
3	阀触发和监测接口试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.2.3 进行
4	控制保护功能接口试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.2.4 进行
5	监控系统接口试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.2.5 进行
6	故障录波接口试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.2.6 进行
7	其他通信接口试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.2.7 进行
8	整定值检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.2.8 进行
9	其他二次回路	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.1.2.2.9 进行

试验后,控制保护装置的电源应工作正常,各接口能正常传输电气和开关量等信号,整定值应与设计值一致。

7.3.1.2.5 启动电阻器

启动电阻器的试验后,试验项目、试验方法和验收准则按照 GB/T 36955 的要求进行。

7.3.2 分系统试验

分系统试验项目和试验方法按照表 6 的要求执行。

表 6 直流融冰装置分系统试验

序号	试验项目	试验方法
1	控制保护装置信号检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.2.2 进行
2	控制保护装置传动试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.2.3 进行
3	其他测控装置和继电保护装置信号检查	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.2.4 进行
4	其他测控装置和继电保护装置保护传动试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.2.5 进行
5	融冰顺序控制试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.2.6 进行

分系统试验中,各设备输入输出信号及设备间信号的传动正确。

7.3.3 系统试验

7.3.3.1 电网换相直流融冰装置

电网换相直流融冰装置系统试验应按表 7 所列项目及顺序执行,试验结果应符合第 5 章和 6.2.1～6.2.4 的要求。

表 7 电网换相直流融冰装置系统试验

序号	试验项目		试验方法
1	不带电系统试验	不带电顺序操作试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.1.1 进行
2		不带电跳闸试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.1.2 进行
3	交流滤波器带电试验		按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.2 进行
4	换流变压器带电试验		按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.3 进行
5	换流器带电试验		按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.4 进行
6	带电跳闸试验		按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.5 进行
7	开路试验		按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.6 进行
8	零功率试验	启停试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.7.2 进行
9		手动紧急停运试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.7.3 进行
10		冗余切换试验(适用时)	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.7.4 进行
11		电流升降试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.7.5 进行
12		电流阶跃试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.7.6 进行
13		额定电流试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.7.7 进行
14	带线路运行试验(选做)		按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.8 进行
15	静止无功补偿功能试验		按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.2.9 进行

7.3.3.2 模块化多电平直流融冰装置

模块化多电平直流融冰装置系统试验按照表 8 所列项目及顺序进行,试验结果应符合第 5 章和 6.3.1~6.3.4 的要求。

表 8 模块化多电平直流融冰装置系统试验

序号	试验项目		试验方法
1	不带电系统试验	不带电顺序操作试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.1.1 进行
2		不带电跳闸试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.1.2 进行
3	换流器带电试验		按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.2 进行
4	带电跳闸试验		按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.3 进行
5	开路试验		按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.4 进行
6	零功率试验	启停试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.5.2 进行
7		手动紧急停运试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.5.3 进行
8		冗余切换试验(适用时)	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.5.4 进行
9		子模块冗余试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.5.5 进行
10		电流升降试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.5.6 进行
11		电流阶跃试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.5.7 进行
12		额定电流试验	按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.5.8 进行
13	带线路运行试验(选做)		按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.6 进行
14	静止同步补偿功能试验		按照 GB/T 31487.3—2025 的 5.3.3.7 进行

8 运行与维护

8.1 通则

直流融冰装置投运后,直流融冰系统的站内设备应作为变电设备进行运行和维护,站外设备应作为输电设备进行运行和维护。

可移动式直流融冰装置的运行维护宜按照 DL/T 2284 要求进行,其中换流器的运输和存放应满足 GB/T 31487.2—2025 中第 7 章的要求。

覆冰期来临之前,按照 GB/T 31487.3—2025 中第 6 章的规定开展一次维护试验,现场具备条件时也可选择合适的线路接入直流融冰装置进行带线路试验。

8.2 运行方式

8.2.1 融冰期运行

在覆冰期内,直流融冰装置应运行在直流融冰模式。融冰方式主要包括线路停电导线融冰、线路停电地线融冰和线路不停电地线融冰。

线路停电导线直流融冰流程、线路停电地线直流融冰流程和线路不停电地线直流融冰流程分别见附录 H 中的 H.1、H.2 和 H.3。

地线融冰可在导线融冰前或者完成后进行。导线融冰和地线融冰方式转换时,直流融冰装置宜处于交流侧热备用状态。三相交流导线“一相对一相”融冰和“一相对两相”融冰的转换可在直流融冰装置热备用状态下进行。融冰作业全部完成后,直流融冰装置可转为检修状态。

线路停电导线融冰、线路停电地线融冰和线路不停电地线流程均可全部或者部分通过融冰顺序控制实现,由融冰导线和地线的当前状态自动转换到目标状态。

8.2.2 非融冰期运行

如果直流融冰装置非融冰期运行在静止无功补偿或静止同步补偿模式,非融冰期应按照静止无功补偿装置或静止同步补偿装置进行运行和维护。

如果直流融冰装置非融冰期不运行在静止无功补偿或静止同步补偿模式,非融冰期直流融冰装置交流侧和直流侧不宜带电,控制保护系统应正常运行,冷却系统可不投入运行。

8.3 设备维护

8.3.1 换流器和控制保护设备

在覆冰期内,换流器和控制保护设备按照带电设备进行巡视和维护。

在非融冰期,换流器和控制保护设备如果闲置,应定期对阀、控制保护装置、冷却系统、柜体和阀室进行巡视,巡视周期不应超过 3 个月,应做好巡视记录。具体要求如下。

- a) 柜体和阀室构件外观和连接正常,绝缘清洁无破损,室内通风、温度和湿度均正常,设备无凝露。阀的部件、触发监视单元、光纤及二次电缆等应连接正常,无脱落和断裂,直流测量装置和避雷器无明显锈蚀、裂纹、积污等影响运行的缺陷。
- b) 控制保护装置屏柜指示灯、监控后台显示和通信正常,定值设置正确,二次线缆连接无松动和发热。
- c) 巡视时启动冷却系统,并检查主泵、管道、支架、阀门等无锈蚀、渗漏、破损、异物等。冷却系统启动后保持运行功能正常无异响,表计指示正确,控制面板无异常报警。

8.3.2 站内其他设备

直流融冰装置交流侧和直流侧设备主要包括换流变压器(如有)、平波电抗器(如有)、断路器、隔离开关、接地开关、融冰母线、感应电压抑制设备(如有)、避雷器、保护间隙、绝缘子等,应按照变电设备要求进行巡视和维护,巡视周期不应超过 3 个月,应无明显锈蚀、裂纹、积污、松动和脱落等,应做好巡视记录。

导线短接隔离开关和融冰母线线路侧隔离开关的分闸和合闸传动试验应结合相应线路停电检修进行,其他开关设备传动试验根据需要进行。

8.3.3 站外设备

站外设备主要包括导线和地线联络隔离开关、地线和引接线联络隔离开关、地线短接隔离开关、地线接地开关和地线融冰引接线等。巡视应结合输电设备巡检进行,各设备应无明显锈蚀、裂纹、积污、松动和脱落等,应做好巡视记录。

站外隔离开关和接地开关的分合闸传动试验应结合输电线路停电检修进行。



附录 A

(资料性)

架空线路融冰电流的计算方法

A.1 架空线路覆冰类型

A.1.1 雨淞

由空气中的过冷却水滴冻结在导线上形成非结晶状,透明,结构紧密,坚硬,附着力强,相对密度在 0.6~0.9,对输电线危害最大。

A.1.2 雾淞

由小雨滴、细雨、雾粒凝结在导线上形成,白色,不透明,羽状,结构疏松,黏附力较弱,易于脱落相对密度通常在 0.1~0.3,对输电线危害最小。

A.1.3 混合淞

雨淞和雾淞的连续冻结物,在天气周期性变化时形成,相对密度通常在 0.2~0.6,对输电线的危害次于雨淞。

A.2 架空导线和地线融冰电流计算方法

架空导线和地线融冰电流由布尔格斯道尔夫经验公式计算,如公式(A.1)所示:

$$I_r^2 \cdot R_0 \cdot T_r = \frac{\Delta t}{R_{T0} + R_{T1}} \times T_r + 10g_0 \cdot d \cdot b + \frac{0.045 \times g_0 \cdot D^2}{R_{T0} + R_{T1}} \times \left(R_{T1} + 0.22 \times \frac{R_{T0}}{\ln(D/d)} \right) \times \Delta t \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

I_r ——融冰电流,单位为安培(A);

R_0 ——0℃时的导线单位长度电阻,单位为欧姆每米(Ω/m);

T_r ——融冰时间,单位为小时(h);

Δt ——导体温度与外界气温之差,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$),导线温度一般取 0℃;

g_0 ——冰的比重(一般按雨淞取 0.9);

d ——导线直径,单位为厘米(cm);

b ——冰层厚度,即覆冰每边冰厚,单位为厘米(cm);

D ——导体覆冰后的外径,单位为厘米(cm), $D = d + 2b$;

R_{T0} ——等效冰层传热阻,单位为摄氏度厘米每瓦特 [$(^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm})/\text{W}$];

R_{T1} ——对流及辐射等效热阻,单位为摄氏度厘米每瓦特 [$(^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm})/\text{W}$].

R_{T0} 由公式(A.2)计算:

$$R_{T0} = \frac{\ln(D/d)}{273 \times \lambda} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

λ ——导热系数,单位为瓦每厘米摄氏度 [$\text{W}/(\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C})$]. 对雨淞, $\lambda = 2.27 \times 10^{-2} [\text{W}/(\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C})]$;

对雾淞, $\lambda = 0.12 \times 10^{-2} [\text{W}/(\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C})]$.

对雨淞, R_{T1} 由公式(A.3)计算:

$$R_{T1} = \frac{1}{0.09 \times D + 0.22 + 0.73 \times (V \cdot D)^{\frac{2}{3}}} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

V ——风速,单位为米每秒(m/s)。

对雾淞, R_{T1} 由公式(A.4)计算:

$$R_{T1} = \frac{1}{0.04 \times D + 0.84 \times (V \cdot D)^{\frac{3}{4}}} \dots\dots\dots (A.4)$$

由公式(A.1)计算的常用架空导线和地线不同覆冰厚度时的融冰电流见表 A.1~表 A.8。

表 A.1 典型钢芯铝绞线融冰电流(融冰时间 1 h)



导线型号	20 ℃ 直流 电阻 Ω/km	融冰电流 A					
		10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
		—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃	—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃
		风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
JL/G1A-70/10-6/1	0.421 7	312	256	216	330	281	247
JL/G1A-95/15-26/7	0.305 9	388	320	271	411	352	311
JL/G1A-95/20-7/7	0.302 0	393	324	276	417	358	316
JL/G1A-120/20-26/7	0.249 6	445	367	313	472	406	360
JL/G1A-120/25-7/7	0.234 6	465	384	328	494	425	377
JL/G1A-150/20-24/7	0.198 1	516	428	366	549	474	421
JL/G1A-150/25-26/7	0.194 0	526	436	374	560	483	430
JL/G1A-150/35-30/7	0.196 2	527	438	375	561	485	432
JL/G1A-185/25-24/7	0.154 3	611	508	437	651	564	504
JL/G1A-185/30-26/7	0.159 2	602	500	430	641	555	496
JL/G1A-185/45-30/7	0.156 4	615	512	440	656	568	508
JL/G1A-240/30-24/7	0.118 1	733	611	528	783	680	610
JL/G1A-240/40-26/7	0.120 9	726	605	523	775	674	604
JL/G1A-240/55-30/7	0.119 8	738	616	532	788	686	615
JL/G1A-250/25-22/7	0.115 6	740	617	533	790	686	615
JL/G1A-300/25-48/7	0.094 4	850	711	616	909	792	712
JL/G1A-300/40-24/7	0.096 1	844	706	611	902	786	707
JL/G1A-300/50-26/7	0.096 4	848	709	615	907	791	711
JL/G1A-300/70-30/7	0.094 6	868	727	630	929	810	730
JL/G1A-400/25-45/7	0.073 7	1 004	842	731	1 075	939	847
JL/G1A-400/35-48/7	0.073 9	1 005	843	733	1 077	941	849

表 A.1 典型钢芯铝绞线融冰电流(融冰时间 1 h)(续)

导线型号	20 ℃ 直流 电阻 Ω/km	融冰电流 A					
		10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
		—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃	—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃
		风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
JL/G1A-400/50-54/7	0.072 4	1 027	862	750	1 101	963	869
JL/G1A-400/65-26/7	0.072 4	1 033	867	755	1 107	969	875
JL/G1A-500/35-45/7	0.057 8	1 189	1 000	872	1 276	1 119	1 012
JL/G1A-500/45-48/7	0.059 1	1 175	988	861	1 261	1 105	999
JL/G1A-500/65-54/7	0.058 0	1 200	1 010	881	1 288	1 130	1 022
JL/G1A-630/45-45/7	0.045 9	1 399	1 179	1 031	1 503	1 321	1 197
JL/G1A-630/55-48/7	0.045 2	1 418	1 196	1 046	1 524	1 340	1 215
注: JL/G1A、JL/G2A、JL/G3A 相同截面下的融冰电流值相等。							

表 A.2 典型钢芯铝合金绞线融冰电流(融冰时间 1 h)

导线型号	20 ℃ 直流 电阻 Ω/km	融冰电流 A					
		10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
		—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃	—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃
		风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
JLHA1/G1A-150/20-24/7	0.230 1	476	395	338	507	437	389
JLHA1/G1A-150/25-26/7	0.225 4	485	402	345	516	446	397
JLHA1/G1A-150/35-30/7	0.228 0	486	403	346	518	447	398
JLHA1/G1A-185/25-24/7	0.179 2	564	469	403	601	520	464
JLHA1/G1A-185/30-26/7	0.185 0	555	461	396	591	512	457
JLHA1/G1A-185/45-30/7	0.181 7	567	472	406	605	524	469
JLHA1/G1A-240/30-24/7	0.137 2	676	564	487	722	627	563
JLHA2/G1A-240/30-24/7	0.135 9	679	567	489	725	630	565
JLHA1/G1A-240/40-26/7	0.140 5	669	558	482	715	621	557
JLHA2/G1A-240/40-26/7	0.139 1	672	561	485	718	624	560
JLHA1/G1A-240/55-30/7	0.139 1	680	568	491	727	633	568
JLHA2/G1A-240/55-30/7	0.137 8	684	571	493	730	636	570
JLHA1/G1A-300/20-45/7	0.110 6	776	648	561	829	722	649
JLHA1/G1A-300/25-48/7	0.109 6	784	656	568	839	731	657
JLHA2/G1A-300/25-48/7	0.108 6	788	659	571	842	734	660

表 A.2 典型钢芯铝合金绞线融冰电流(融冰时间 1 h)(续)

导线型号	20 ℃ 直流 电阻 Ω/km	融冰电流 A					
		10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
		—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃	—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃
		风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
JLHA1/G1A-300/40-24/7	0.111 7	778	651	564	832	725	652
JLHA2/G1A-300/40-24/7	0.110 7	781	654	566	836	728	655
JLHA1/G1A-300/50-26/7	0.112 0	782	654	567	836	729	656
JLHA2/G1A-300/50-26/7	0.110 9	786	657	570	840	733	659
JLHA1/G1A-300/70-30/7	0.109 9	800	670	581	856	747	673
JLHA1/G1A-400/35-48/7	0.085 9	927	777	676	993	868	783
JLHA2/G1A-400/35-48/7	0.085 1	931	781	679	997	872	786
JLHA1/G1A-400/50-54/7	0.084 1	947	795	692	1 015	888	802
JLHA2/G1A-400/50-54/7	0.083 3	952	799	695	1 020	892	805
JLHA1/G1A-400/65-26/7	0.084 1	953	800	696	1 021	894	807
JLHA2/G1A-400/65-26/7	0.083 3	957	804	699	1 026	898	811
JLHA1/G1A-400/95-30/19	0.082 3	978	822	716	1 049	918	830
JLHA2/G1A-400/95-30/19	0.081 6	982	825	719	1 053	922	833
JLHA1/G1A-460/60-54/7	0.072 3	1 053	885	772	1 130	990	895
JLHA1/G1A-500/35-45/7	0.067 2	1 097	922	804	1 177	1 031	933
JLHA2/G1A-500/35-45/7	0.066 6	1 101	926	808	1 182	1 036	937
JLHA1/G1A-500/45-48/7	0.068 7	1 083	911	794	1 162	1 018	921
JLHA2/G1A-500/45-48/7	0.068 1	1 088	915	798	1 167	1 023	925
JLHA1/G1A-500/65-54/7	0.067 0	1 111	935	816	1 193	1 046	947
JLHA2/G1A-500/65-54/7	0.066 3	1 117	940	820	1 199	1 052	952
JLHA1/G1A-630/45-45/7	0.053 3	1 290	1 088	951	1 387	1 218	1 105
JLHA2/G1A-630/45-45/7	0.052 8	1 296	1 093	956	1 393	1 224	1 110
JLHA1/G1A-630/55-48/7	0.052 5	1 308	1 103	965	1 406	1 235	1 121
JLHA2/G1A-630/55-48/7	0.052 0	1 314	1 108	970	1 413	1 241	1 126
JLHA1/G1A-630/80-54/19	0.054 0	1 293	1 090	954	1 390	1 221	1 108
注 1: JLHA1/G1A、JLHA1/G2A、JLHA1/G3A 相同截面下的融冰电流值相等。							
注 2: JLHA2/G1A、JLHA2/G2A、JLHA2/G3A 相同截面下的融冰电流值相等。							

表 A.3 典型铝包钢芯铝绞线融冰电流(融冰时间 1 h)

导线型号	20 ℃ 直流 电阻 Ω/km	融冰电流 A					
		10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
		—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃	—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃
		风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
JL/LB14-120/7-18/1	0.239 1	446	368	314	474	407	360
JL/LB20A-120/20-26/7	0.226 9	468	387	330	497	427	379
JL/LB20A-120/25-7/7	0.219 9	478	395	338	508	437	388
JL/LB20A-150/20-24/7	0.189 8	526	435	373	559	482	429
JL/LB20A-150/25-26/7	0.183 8	538	446	382	573	495	440
JL/LB14-150/35-30/7	0.186 1	539	448	384	574	496	442
JL/LB20A-150/35-30/7	0.181 8	546	453	388	581	502	447
JL/LB20A-185/25-24/7	0.147 8	622	517	444	663	574	512
JL/LB14-185/30-26/7	0.153 4	610	507	436	650	563	503
JL/LB20A-185/30-26/7	0.150 9	615	512	440	656	568	507
JL/LB14-185/45-30/7	0.148 3	629	523	450	671	581	520
JL/LB20A-185/45-30/7	0.144 9	636	529	456	678	588	526
JL/LB14-240/30-24/7	0.114 6	741	618	534	791	688	617
JL/LB20A-240/30-24/7	0.113 1	746	622	537	797	693	621
JL/LB14-240/40-26/7	0.116 5	736	614	531	786	684	613
JL/LB20A-240/40-26/7	0.114 6	742	619	535	793	689	618
JL/LB14-240/55-30/7	0.113 6	754	630	545	806	701	630
JL/LB20A-240/55-30/7	0.111 0	763	637	551	816	710	637
JL/LB20A-300/25-48/7	0.091 6	859	719	623	919	801	720
JL/LB14-300/40-24/7	0.093 3	853	713	618	912	795	715
JL/LB20A-300/40-24/7	0.092 1	858	718	622	918	800	720
JL/LB14-300/50-26/7	0.092 9	860	720	624	920	802	722
JL/LB20A-300/50-26/7	0.091 3	868	726	629	928	809	728
JL/LB14-300/70-30/7	0.089 7	887	743	645	950	829	746
JL/LB20A-400/25-45/7	0.072 0	1 011	848	737	1 083	947	854
JL/LB14-400/35-48/7	0.072 4	1 011	848	737	1 084	947	854

表 A.3 典型铝包钢芯铝绞线融冰电流(融冰时间 1 h)(续)

导线型号	20 ℃ 直流 电阻 Ω/km	融冰电流 A					
		10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
		—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃	—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃
		风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
JL/LB20A-400/35-48/7	0.071 8	1 016	852	740	1 088	951	858
JL/LB14-400/50-54/7	0.070 2	1 039	872	759	1 114	974	879
JL/LB20A-400/50-54/7	0.069 3	1 046	878	763	1 121	980	885
JL/LB14-400/65-26/7	0.069 7	1 049	880	766	1 124	984	888
JL/LB20A-550/40-45/7	0.051 2	1 284	1 081	943	1 378	1 209	1 095
JL/LB14-630/45-45/7	0.045 6	1 394	1 175	1 028	1 498	1 316	1 193
JL/LB20A-630/45-45/7	0.045 3	1 399	1 179	1 031	1 503	1 321	1 197
JL/LB14-630/55-48/7	0.044 2	1 428	1 205	1 054	1 535	1 349	1 224
JL/LB20A-630/55-48/7	0.043 8	1 435	1 210	1 059	1 542	1 355	1 229

表 A.4 典型镀锌钢绞线融冰电流(融冰时间 1 h)

导线型号	20 ℃ 直流 电阻 Ω/km	融冰电流 A					
		10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
		—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃	—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃
		风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
JG1A-50-7	3.914 6	96	78	65	101	86	74
JG1A-50-19	4.024 8	95	77	64	100	84	73
JG1A-60-19	3.260 1	109	89	74	114	97	85
JG1A-70-19	2.694 3	123	101	85	130	111	97
JG1A-80-7	2.439 9	131	107	90	138	118	103
JG1A-80-19	2.465 1	130	107	90	138	117	103
JG1A-90-7	2.202 0	140	115	97	148	126	111
JG1A-100-19	1.929 1	153	126	107	162	139	122
JG1A-150-19	1.273 5	202	167	143	215	185	164
注：JG1A、JG2A、JG3A、JG4A、JG5A 相同截面下的融冰电流值相等。							

表 A.5 在运线路其他常见型号导线融冰电流(融冰时间 1 h)

导线型号	20 ℃ 直流 电阻 Ω/km	融冰电流 A					
		10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
		—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃	—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃
		风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
LGJ-50/8	0.594 6	250	204	171	263	223	194
LGJ-50/30	0.569 2	270	222	187	286	244	214
LGJ-70/10	0.421 7	312	256	216	330	281	247
LGJ-70/40	0.414 1	333	275	233	353	303	268
LGJ-95/15	0.305 8	388	320	272	411	353	311
LGJ-95/20	0.301 9	393	324	275	417	357	316
LGJ-95/55	0.299 2	414	343	293	440	379	337
LGJ-120/7	0.242 2	445	368	313	472	406	359
LGJ-120/20	0.249 6	444	367	313	472	406	360
LGJ-120/25	0.234 5	465	385	329	494	426	378
LGJ-120/70	0.236 4	485	403	346	517	447	398
LGJ-150/8	0.198 9	508	420	359	540	465	413
LGJ-150/20	0.198 0	516	428	366	549	474	421
LGJ-150/25	0.193 9	526	436	374	560	483	430
LGJ-150/35	0.196 2	527	438	375	561	485	432
LGJ-185/10	0.157 2	595	494	424	634	548	489
LGJ-185/25	0.154 2	611	508	437	651	564	504
LGJ-185/30	0.159 2	601	500	430	641	555	496
LGJ-185/45	0.156 4	615	512	440	656	568	508
LGJ-210/10	0.141 1	640	532	458	682	591	528
LGJ-210/25	0.138 0	659	549	473	703	610	545
LGJ-210/35	0.136 3	668	556	480	713	618	554
LGJ-210/50	0.138 1	669	558	481	714	620	556
LGJ-240/30	0.118 1	733	611	528	783	680	610
LGJ-240/40	0.120 9	725	605	522	774	673	604
LGJ-240/55	0.119 8	738	616	532	788	686	615

表 A.5 在运线路其他常见型号导线融冰电流(融冰时间 1 h)(续)

导线型号	20 ℃ 直流 电阻 Ω/km	融冰电流 A					
		10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
		—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃	—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃
		风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
LGJ-300/50	0.096 4	847	709	614	906	790	711
LGJ-300/70	0.094 6	867	726	630	929	810	730
LGJ-400/50	0.072 3	1 028	863	751	1 102	964	870
LGJ-400/65	0.072 4	1 033	867	755	1 108	969	875
LGJ-500/35	0.058 1	1 185	996	869	1 271	1 114	1 007
LGJ-500/45	0.059 1	1 175	988	861	1 260	1 105	999
LGJ-500/65	0.057 6	1 205	1 014	885	1 294	1 134	1 027
LGJ-630/45	0.046 3	1 389	1 171	1 024	1 492	1 311	1 189
LGJ-630/55	0.045 1	1 419	1 197	1 047	1 526	1 341	1 216
LGJ-630/80	0.045 5	1 422	1 200	1 050	1 529	1 344	1 219
LGJ-720/50	0.039 8	1 545	1 305	1 143	1 662	1 462	1 328
LGJ-800/55	0.035 5	1 678	1 418	1 244	1 806	1 590	1 446
LGJ-800/70	0.035 7	1 675	1 416	1 242	1 802	1 588	1 443
LGJ-800/100	0.036 4	1 668	1 410	1 237	1 795	1 582	1 438
LGJQ-150	0.207 0	503	416	356	534	461	410
LGJQ-185	0.168 0	578	480	412	616	533	475
LGJQ-240	0.117 0	740	617	533	790	687	616
LGJQ-300	0.099 7	826	690	598	883	769	692
LGJQ-400	0.074 8	1 007	845	735	1 079	944	852
LGJQ-500	0.062 0	1 149	967	843	1 233	1 081	978
LGJQ-600	0.051 1	1 316	1 109	970	1 414	1 242	1 126
LGJQ-700	0.042 9	1 489	1 257	1 101	1 602	1 409	1 279
LGJJ-150	0.202 0	520	431	370	553	478	426
LGJJ-185	0.161 0	606	504	434	646	560	501
LGJJ-240	0.123 0	728	608	525	778	677	607
LGJJ-300	0.093 7	878	736	639	940	821	739
LGJJ-400	0.072 6	1 048	881	768	1 125	985	890

表 A.6 在运线路其他常见型号镀锌钢绞线融冰电流(融冰时间 1 h)

地线型号	规格	20 ℃ 直流电阻 Ω/km	融冰电流 A					
			10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
			—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃	—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃
			风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
1×7-7.8-1270-B	JG1A-35	5.211 8	82	66	55	86	72	62
1×7-8.7-1270-B	JG1A-40	4.536 2	91	74	61	95	80	70
1×7-9.0-1270-B	JG1A-50	3.914 6	98	80	67	103	88	76
1×7-9.6-1270-B	JG1A-55	3.440 6	107	87	73	113	95	83
1×19-10.0-1270-A	JG1A-60	3.260 1	111	91	76	117	100	87
1×7-10.5-1270-B	JG1A-65	2.876 1	120	98	83	127	108	94
1×19-11.0-1270-A	JG1A-70	2.694 3	126	103	87	133	113	99
1×7-11.4-1270-B	JG1A-80	2.439 9	134	110	92	141	120	106
1×19-11.5-1270-A	JG1A-80	2.465 1	134	110	93	141	120	106
1×19-13.0-1270-A	JG1A-100	1.929 1	157	129	110	166	142	126
1×19-14.5-1270-B	JG1A-125	1.550 6	182	150	128	193	166	147
1×19-16.0-1370-B	JG2A-150	1.273 5	207	171	147	220	190	168
1×19-17.5-1370-B	JG2A-185	1.064 5	234	194	166	249	215	191

表 A.7 典型铝包钢绞线融冰电流(融冰时间 1 h)

导线型号	20 ℃ 直流电阻 Ω/km	融冰电流 A					
		10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
		—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃	—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃
		风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
JLB14-50-7	2.521 5	119	97	81	125	105	92
JLB14-80-7	1.571 6	161	132	111	170	145	127
JLB14-150-19	0.846 7	244	202	173	260	223	198
JLB14-185-19	0.685 8	281	233	200	299	258	230
JLB14-210-19	0.597 4	309	257	221	329	285	254
JLB20A-50-7	1.736 3	143	116	97	150	127	110
JLB20A-80-7	1.082 2	194	159	134	205	175	153
JLB20A-100-19	0.855 8	228	187	159	241	206	182
JLB20A-120-19	0.712 2	258	212	181	273	235	207
JLB20A-150-19	0.583 0	294	243	208	313	269	239

表 A.7 典型铝包钢绞线融冰电流(融冰时间 1 h)(续)

导线型号	20 ℃ 直流 电阻 Ω/km	融冰电流 A					
		10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
		−8 ℃	−5 ℃	−3 ℃	−8 ℃	−5 ℃	−3 ℃
		风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
JLB27-50-7	1.307 5	165	134	112	173	146	127
JLB27-55-7	1.149 2	179	146	122	188	160	139
JLB27-150-19	0.439 0	339	281	240	360	310	276
JLB35-50-7	1.008 6	187	153	128	197	167	145
JLB35-100-19	0.497 1	299	246	208	316	271	239
JLB40-50-7	0.882 5	200	163	136	211	178	155
JLB40-80-7	0.550 0	272	223	188	288	245	215
JLB40-95-7	0.458 9	307	252	214	325	278	245
JLB40-100-19	0.434 9	319	263	223	338	290	255
JLB40-120-19	0.362 0	361	298	254	383	329	291
JLB40-150-19	0.296 3	413	341	292	438	378	335
JLB40-185-19	0.240 0	475	394	338	506	437	389

表 A.8 常用光纤复合地线融冰电流(融冰时间 1 h)

光纤复合地线 型号	20 ℃ 直流 电阻 Ω/km	融冰电流 A					
		10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
		−8 ℃	−5 ℃	−3 ℃	−8 ℃	−5 ℃	−3 ℃
		风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
OPGW-9-40-1	2.128 8	130	106	88	137	116	100
OPGW-10-50-1	1.821 1	142	116	97	150	127	111
OPGW-11-70-1	1.301 6	177	145	123	187	160	140
OPGW-11-70-2	0.706 5	242	198	167	255	218	191
OPGW-13-90-1	0.986 9	214	176	149	226	194	171
OPGW-13-90-2	0.520 5	294	242	205	311	266	235
OPGW-13-100-1	0.937 1	220	181	153	232	199	176
OPGW-13-100-2	0.494 3	302	249	211	320	274	242
OPGW-14-110-1	0.837 3	237	195	166	251	216	191
OPGW-14-110-2	0.801 7	243	200	171	258	221	196
OPGW-14-110-3	0.401 8	344	283	241	364	313	277

表 A.8 常用光纤复合地线融冰电流(融冰时间 1 h)(续)

光纤复合地线 型号	20 ℃ 直流 电阻 Ω/km	融冰电流 A					
		10 mm 覆冰			15 mm 覆冰		
		—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃	—8 ℃	—5 ℃	—3 ℃
		风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s	风速 8 m/s	风速 5 m/s	风速 3 m/s
OPGW-14.6-120-1	0.773 2	249	206	175	265	227	201
OPGW-14.6-120-2	0.553 4	295	244	207	313	269	238
OPGW-14.6-120-3	0.422 4	338	279	237	358	308	273
OPGW-15-120-1	0.761 9	254	210	179	270	232	206
OPGW-15-120-2	0.530 9	305	252	215	323	278	247
OPGW-15-120-3	0.405 4	351	290	247	372	320	284
OPGW-15-130-1	0.726 5	261	216	184	277	239	212
OPGW-15-130-2	0.501 5	314	259	221	333	287	254
OPGW-15-130-3	0.400 0	351	290	247	372	320	284
OPGW-16-140-1	0.653 1	280	232	198	298	257	228
OPGW-16-140-2	0.458 7	337	279	238	358	309	274
OPGW-16-140-3	0.316 4	406	336	287	432	372	330
OPGW-17-150-1	0.603 0	295	244	209	314	271	241
OPGW-17-150-2	0.423 8	353	292	250	375	323	288
OPGW-17-150-3	0.332 0	398	330	282	423	365	324
OPGW-17-150-4	0.644 4	286	237	202	304	262	233
OPGW-17-150-5	0.452 7	341	282	241	362	312	278
OPGW-18-170-1	0.546 1	317	263	226	338	292	260
OPGW-18-170-2	0.544 7	321	267	229	342	296	264
OPGW-18-180-1	0.726 9	278	231	198	296	256	228
OPGW-18-180-2	0.500 5	334	277	238	355	307	274
OPGW-18-180-3	0.351 9	399	331	284	425	367	328
OPGW-18-180-4	0.285 3	446	370	318	475	411	366
注：OPGW-××-Y-Z 中的××表示 B1.1 类光纤和 B4 类光纤芯数，融冰电流与该参数无关，不同芯数通用。							

附录 B

(资料性)

架空线路最大允许融冰电流的计算方法

B.1 计算参数

B.1.1 允许温度

融冰时导线和地线(含 OPGW 光缆)的最高运行温度按制造厂提供的数据或通过试验确定。如无资料,钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线一般取 90 °C。

B.1.2 环境参数

导线和地线融冰最大允许电流与环境温度、风速等因素有关。校核融冰最大允许电流时,环境温度、风速取融冰线路(或融冰段)各档中最高气温和相应的最小风速。

B.2 导线和地线最大允许融冰电流的计算方法

相同环境参数下,导线和地线的最大允许融冰电流就是其最大允许载流量。GB 50545—2010 选用摩根公式计算导线和地线发热允许载流量。

摩根公式见公式(B.1):

$$I = \sqrt{(W_R + W_F - W_S)/R'_t} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

I ——最大允许载流量/最大允许融冰电流,单位为安培(A);

W_R ——单位长度导线的辐射散热功率,单位为瓦特每米(W/m);

W_F ——单位长度导线的对流散热功率,单位为瓦特每米(W/m);

W_S ——单位长度导线的日照吸热功率,单位为瓦特每米(W/m);

R'_t ——允许温度时导线的电阻,单位为欧姆每米(Ω /m)。

辐射散热功率 W_R 由公式(B.2)计算:

$$W_R = \pi \times D \cdot E_1 \cdot S_1 \times [(\theta + \theta_a + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

D ——导线外径,单位为米(m);

E_1 ——导线表面的辐射散热因数。光亮的新线为 0.23~0.43,旧线或涂黑色防腐剂的线为 0.90~0.95;

S_1 ——斯特凡-包尔茨曼常数, $S_1 = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$;

θ ——导线表面的平均温升,单位为摄氏度(°C);

θ_a ——环境温度,单位为摄氏度(°C)。

对流散热功率 W_F 由公式(B.3)计算:

$$W_F = 0.57\pi \times \lambda_f \cdot \theta \cdot R_e^{0.485} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

λ_f ——导线表面空气层的传热系数,单位为瓦特每米摄氏度[W/(m·°C)];

R_e ——雷诺数。

λ_f 和 R_e 分别由公式(B.4)和公式(B.5)计算:

$$\lambda_f = 2.42 \times 10^{-2} + 7 \times (\theta_a + \theta/2) \times 10^{-5} \dots\dots\dots (B.4)$$

$$R_e = V \cdot D/\nu \dots\dots\dots (B.5)$$

式中：
V ——垂直于导线风速，单位为米每秒(m/s)；
ν ——导线表面空气层的运动粘度，单位为平方米每秒(m²/s)。
ν 由公式(B.6)计算：

$$\nu = 1.32 \times 10^{-5} + 9.6 \times (\theta_a + \theta/2) \times 10^{-8} \dots\dots\dots (B.6)$$

日照吸热功率 W_s 由公式(B.7)计算：

$$W_s = \alpha_s \cdot J_s \cdot D \dots\dots\dots (B.7)$$

式中：
α_s ——导线表面的吸热因数，光亮的新线为 0.35~0.46；旧线或涂黑色防腐剂的线为 0.9~0.95；
J_s ——日光对导线的日照强度，单位为瓦特每平方米(W/m²)；当晴天、日光直射导线时，一般采用 1 000 W/m²。

按公式(B.1)计算的常用导线和地线在典型环境条件下的最大允许融冰电流见表 B.1~表 B.8。不同环境参数下对应最大允许融冰电流不同，计算条件变化时根据最大允许融冰电流计算公式重新计算。

表 B.1 典型钢芯铝绞线的最大允许融冰电流

导线型号	最大允许融冰电流 A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
JL/G1A-70/10-6/1	392	460	506	358	421	463
JL/G1A-95/15-26/7	482	565	621	439	516	568
JL/G1A-95/20-7/7	487	572	629	444	523	575
JL/G1A-120/20-26/7	548	642	706	499	587	646
JL/G1A-120/25-7/7	571	669	735	520	611	673
JL/G1A-150/20-24/7	631	740	813	575	676	743
JL/G1A-150/25-26/7	642	752	826	584	687	755
JL/G1A-150/35-30/7	642	752	826	585	687	756
JL/G1A-185/25-24/7	738	865	950	672	790	869
JL/G1A-185/30-26/7	727	852	936	662	777	855
JL/G1A-185/45-30/7	740	867	953	674	792	871
JL/G1A-240/30-24/7	874	1 023	1 124	795	934	1 027
JL/G1A-240/40-26/7	865	1 012	1 112	787	924	1 016
JL/G1A-240/55-30/7	876	1 025	1 126	797	935	1 029
JL/G1A-250/25-22/7	882	1 033	1 134	803	943	1 036

表 B.1 典型钢芯铝绞线的最大允许融冰电流 (续)

导线型号	最大允许融冰电流 A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
JL/G1A-300/25-48/7	1 003	1 173	1 288	912	1 070	1 176
JL/G1A-300/40-24/7	995	1 164	1 278	905	1 062	1 167
JL/G1A-300/50-26/7	998	1 167	1 281	907	1 065	1 170
JL/G1A-300/70-30/7	1 017	1 189	1 306	924	1 085	1 192
JL/G1A-400/25-45/7	1 168	1 366	1 500	1 062	1 246	1 369
JL/G1A-400/35-48/7	1 169	1 367	1 500	1 062	1 246	1 370
JL/G1A-400/50-54/7	1 190	1 392	1 527	1 081	1 269	1 394
JL/G1A-400/65-26/7	1 195	1 397	1 533	1 085	1 273	1 399
JL/G1A-500/35-45/7	1 363	1 593	1 748	1 238	1 451	1 595
JL/G1A-500/45-48/7	1 347	1 574	1 727	1 223	1 434	1 576
JL/G1A-500/65-54/7	1 370	1 601	1 756	1 244	1 459	1 603
JL/G1A-630/45-45/7	1 577	1 842	2 020	1 431	1 677	1 843
JL/G1A-630/55-48/7	1 595	1 863	2 044	1 448	1 697	1 864
注 1: 表中绞线最大允许载流量/最大允许融冰电流计算条件: 绞线允许温度 70 ℃、辐射因数 0.9、吸收因数 0.9、日照强度 0.1 W/cm ² , 大跨越段绞线允许温度取 90 ℃。 注 2: JL/G1A、JL/G2A、JL/G3A 相同截面下的最大允许载流量/最大允许融冰电流相等。						

表 B.2 典型钢芯铝合金绞线的导线最大允许融冰电流

导线型号	最大允许融冰电流 A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
JLHA1/G1A-150/20-24/7	593	695	763	540	634	698
JLHA1/G1A-150/25-26/7	602	706	776	549	645	709
JLHA1/G1A-150/35-30/7	602	706	776	549	645	709
JLHA1/G1A-185/25-24/7	693	812	892	631	742	816
JLHA1/G1A-185/30-26/7	682	799	878	621	730	803
JLHA1/G1A-185/45-30/7	695	814	894	633	743	817
JLHA1/G1A-240/30-24/7	820	961	1 055	746	876	964

表 B.2 典型钢芯铝合金绞线的导线最大允许融冰电流 (续)

导线型号	最大允许融冰电流					
	A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
JLHA2/G1A-240/30-26/7	605	709	780	551	648	713
JLHA2/G1A-240/40-30/7	605	710	780	551	648	713
JLHA1/G1A-240/40-26/7	812	950	1 044	738	867	953
JLHA1/G1A-240/55-30/7	823	963	1 057	748	878	966
JLHA2/G1A-240/55-18/1	681	798	877	620	729	802
JLHA1/G1A-300/20-45/7	933	1 092	1 199	849	996	1 095
JLHA1/G1A-300/25-48/7	941	1 102	1 210	856	1 005	1 105
JLHA2/G1A-300/25-30/7	946	1 107	1 215	860	1 010	1 110
JLHA1/G1A-300/40-24/7	934	1 093	1 199	849	996	1 096
JLHA2/G1A-300/40-24/7	938	1 097	1 205	853	1 001	1 100
JLHA1/G1A-300/50-26/7	936	1 096	1 203	851	999	1 099
JLHA2/G1A-300/50-26/7	941	1 101	1 209	856	1 004	1 104
JLHA1/G1A-300/70-30/7	954	1 117	1 226	868	1 018	1 119
JLHA1/G1A-400/35-48/7	1 097	1 283	1 408	997	1 170	1 286
JLHA2/G1A-400/35-48/7	1 102	1 289	1 415	1 002	1 175	1 292
JLHA1/G1A-400/50-54/7	1 117	1 307	1 434	1 015	1 191	1 309
JLHA2/G1A-400/50-54/7	1 123	1 313	1 441	1 020	1 197	1 315
JLHA1/G1A-400/65-26/7	1 122	1 311	1 439	1 019	1 195	1 314
JLHA2/G1A-400/65-26/7	1 127	1 318	1 446	1 024	1 201	1 320
JLHA1/G1A-400/95-30/19	1 145	1 339	1 469	1 040	1 220	1 341
JLHA2/G1A-400/95-30/19	1 150	1 345	1 476	1 045	1 225	1 347
JLHA1/G1A-460/60-54/7	1 230	1 437	1 577	1 117	1 310	1 439
JLHA1/G1A-500/35-45/7	1 279	1 495	1 640	1 161	1 362	1 497
JLHA2/G1A-500/35-45/7	1 285	1 501	1 647	1 167	1 368	1 503
JLHA1/G1A-500/45-48/7	1 264	1 477	1 621	1 148	1 346	1 479
JLHA2/G1A-500/45-48/7	1 269	1 484	1 628	1 153	1 352	1 486
JLHA1/G1A-500/65-54/7	1 291	1 508	1 655	1 172	1 374	1 510
JLHA2/G1A-500/65-54/7	1 298	1 516	1 664	1 178	1 382	1 518
JLHA1/G1A-630/45-45/7	1 481	1 730	1 897	1 344	1 575	1 730
JLHA2/G1A-630/45-45/7	1 488	1 738	1 906	1 350	1 583	1 739
JLHA1/G1A-630/55-48/7	1 498	1 749	1 919	1 359	1 593	1 750

表 B.2 典型钢芯铝合金绞线的导线最大允许融冰电流 (续)

导线型号	最大允许融冰电流					
	A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
JLHA2/G1A-630/55-48/7	1 505	1 758	1 928	1 366	1 601	1 758
JLHA1/G1A-630/80-54/19	1 479	1 727	1 895	1 342	1 573	1 728

注 1：表中导线最大允许融冰电流的计算条件同表 B.1。

注 2：JLHA1/G1A、JLHA1/G2A、JLHA1/G3A 相同截面下的最大允许载流量/最大允许融冰电流相等。

注 3：JLHA2/G1A、JLHA2/G2A、JLHA2/G3A 相同截面下的最大允许载流量/最大允许融冰电流相等。

表 B.3 典型铝包钢芯铝绞线的最大允许融冰电流

导线型号	最大允许融冰电流					
	A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
JL/LB14-120/7-18/1	599	700	768	555	649	713
JL/LB20A-120/20-26/7	625	730	801	579	677	743
JL/LB20A-120/25-7/7	638	745	817	591	691	758
JL/LB20A-150/20-24/7	698	815	894	647	756	829
JL/LB20A-150/25-26/7	714	833	914	661	773	848
JL/LB14-150/35-30/7	714	833	914	661	772	848
JL/LB20A-150/35-30/7	723	843	924	669	782	857
JL/LB20A-185/25-24/7	818	954	1 046	757	884	970
JL/LB14-185/30-26/7	803	936	1 026	743	868	952
JL/LB20A-185/30-26/7	810	944	1 035	749	875	960
JL/LB14-185/45-30/7	825	961	1 054	763	891	977
JL/LB20A-185/45-30/7	834	973	1 066	772	902	989
JL/LB14-240/30-24/7	963	1 122	1 229	891	1 040	1 140
JL/LB20A-240/30-24/7	969	1 129	1 237	897	1 047	1 147
JL/LB14-240/40-26/7	956	1 114	1 221	885	1 032	1 132
JL/LB20A-240/40-26/7	964	1 123	1 231	892	1 041	1 141
JL/LB14-240/55-30/7	977	1 138	1 246	904	1 054	1 156
JL/LB20A-240/55-30/7	988	1 151	1 261	914	1 066	1 169
JL/LB20A-300/25-48/7	1 106	1 287	1 410	1 023	1 193	1 307
JL/LB14-300/40-24/7	1 097	1 277	1 399	1 015	1 183	1 297

表 B.3 典型铝包钢芯铝绞线的最大允许融冰电流 (续)

导线型号	最大允许融冰电流					
	A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
JL/LB20A-300/40-24/7	1 104	1 285	1 408	1 021	1 191	1 305
JL/LB14-300/50-26/7	1 104	1 285	1 408	1 021	1 191	1 305
JL/LB20A-300/50-26/7	1 114	1 296	1 420	1 030	1 201	1 317
JL/LB14-300/70-30/7	1 135	1 321	1 446	1 049	1 223	1 341
JL/LB20A-400/25-45/7	1 285	1 495	1 637	1 189	1 385	1 518
JL/LB14-400/35-48/7	1 284	1 494	1 636	1 188	1 384	1 516
JL/LB20A-400/35-48/7	1 290	1 500	1 643	1 193	1 390	1 523
JL/LB14-400/50-54/7	1 315	1 529	1 674	1 216	1 416	1 552
JL/LB20A-400/50-54/7	1 323	1 539	1 685	1 224	1 425	1 562
JL/LB14-400/65-26/7	1 325	1 540	1 686	1 225	1 427	1 563
JL/LB20A-550/40-45/7	1 598	1 856	2 031	1 477	1 719	1 882
JL/LB14-630/45-45/7	1 722	1 999	2 187	1 591	1 851	2 026
JL/LB20A-630/45-45/7	1 728	2 006	2 194	1 596	1 857	2 033
JL/LB14-630/55-48/7	1 759	2 042	2 233	1 625	1 890	2 069
JL/LB20A-630/55-48/7	1 767	2 051	2 244	1 633	1 899	2 079
注：铝包钢芯铝绞线允许温度取的 80 ℃，其余计算条件同表 B.1。						

表 B.4 典型镀锌钢绞线的最大允许融冰电流

导线型号	最大允许融冰电流					
	A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
JG1A-50-7	156	181	197	149	173	189
JG1A-50-19	154	178	195	147	171	186
JG1A-60-19	176	204	222	168	195	213
JG1A-70-19	199	230	251	190	220	240
JG1A-80-7	211	244	266	202	234	255
JG1A-80-19	210	243	265	201	233	254
JG1A-90-7	225	260	284	216	249	272
JG1A-100-19	246	284	310	236	272	297
JG1A-150-19	321	370	404	308	355	387
注 1：镀锌钢绞线允许温度取的 125 ℃，其余计算条件同表 B.1。						
注 2：JG1A、JG2A、JG3A、JG4A、JG5A 相同截面下的最大允许载流量/最大允许融冰电流值相等。						

表 B.5 在运线路其他常见型号导线的最大允许融冰电流

导线型号	最大允许融冰电流 A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
LGJ-50/8	332	389	428	303	356	392
LGJ-50/30	337	396	436	308	362	399
LGJ-70/10	410	481	529	374	440	484
LGJ-70/40	414	486	534	378	444	489
LGJ-95/15	484	568	624	441	519	571
LGJ-95/20	506	593	651	461	541	596
LGJ-95/55	495	581	638	451	531	584
LGJ-120/7	556	652	716	507	595	655
LGJ-120/20	554	649	713	504	593	652
LGJ-120/25	591	693	761	539	633	696
LGJ-120/70	571	670	736	521	612	673
LGJ-150/8	630	738	811	573	674	741
LGJ-150/20	635	744	818	578	680	748
LGJ-150/25	646	757	831	588	691	760
LGJ-150/35	647	758	832	589	692	761
LGJ-185/10	732	857	941	666	782	861
LGJ-185/25	738	865	950	672	790	869
LGJ-185/30	734	860	944	668	785	863
LGJ-185/45	734	860	945	669	785	864
LGJ-210/10	783	918	1 008	713	837	921
LGJ-210/25	796	933	1 024	725	851	936
LGJ-210/35	806	944	1 037	733	861	947
LGJ-210/50	808	946	1 039	735	863	949
LGJ-240/30	875	1 024	1 124	796	934	1 027
LGJ-240/40	872	1 021	1 121	793	931	1 024
LGJ-240/55	894	1 047	1 149	813	955	1 049
LGJ-300/50	1 007	1 178	1 294	916	1 075	1 181
LGJ-300/70	1 041	1 218	1 336	946	1 110	1 220



表 B.5 在运线路其他常见型号导线的最大允许融冰电流（续）

导线型号	最大允许融冰电流 A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
LGJ-400/50	1 195	1 398	1 534	1 086	1 274	1 400
LGJ-400/65	1 217	1 422	1 561	1 105	1 296	1 424
LGJ-500/35	1 358	1 587	1 741	1 233	1 446	1 589
LGJ-500/45	1 358	1 586	1 741	1 233	1 445	1 588
LGJ-500/65	1 406	1 642	1 801	1 276	1 495	1 643
LGJ-630/45	1 567	1 830	2 008	1 422	1 667	1 832
LGJ-630/55	1 597	1 865	2 045	1 449	1 698	1 866
LGJ-630/80	1 596	1 864	2 044	1 448	1 697	1 865
LGJ-720/50	1 725	2 014	2 208	1 564	1 833	2 014
LGJ-800/55	1 856	2 166	2 375	1 683	1 971	2 165
LGJ-800/70	1 851	2 160	2 369	1 679	1 966	2 160
LGJ-800/100	1 841	2 148	2 355	1 669	1 955	2 147
LGJQ-150	615	721	792	560	658	724
LGJQ-185	701	822	903	638	750	825
LGJQ-240	881	1 031	1 133	801	941	1 035
LGJQ-300	974	1 140	1 252	886	1 040	1 144
LGJQ-400	1 168	1 366	1 499	1 062	1 245	1 369
LGJQ-500	1 317	1 539	1 688	1 196	1 402	1 541
LGJQ-600	1 488	1 738	1 906	1 350	1 583	1 739
LGJQ-700	1 662	1 940	2 127	1 507	1 766	1 940
LGJJ-150	633	741	815	576	677	745
LGJJ-185	730	855	939	664	780	858
LGJJ-240	864	1 012	1 111	786	923	1 015
LGJJ-300	1 027	1 201	1 318	933	1 095	1 204
LGJJ-400	1 206	1 410	1 547	1 096	1 285	1 412
注：表中导线最大允许载流量/最大允许融冰电流的计算条件同表 B.1。						

表 B.6 在运线路其他常见型号镀锌钢绞线的最大允许融冰电流

地线型号	最大允许融冰电流					
	A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
1×7-7.8-1270-B	130	151	165	124	144	158
1×7-8.7-1270-B	143	166	182	137	159	174
1×7-9.0-1270-B	156	181	197	149	173	189
1×7-9.6-1270-B	169	196	214	162	188	205
1×19-10.0-1270-A	176	204	222	168	195	213
1×7-10.5-1270-B	190	220	240	182	210	230
1×19-11.0-1270-A	199	230	251	190	220	240
1×7-11.4-1270-B	211	244	266	202	234	255
1×19-11.5-1270-A	210	243	265	201	233	254
1×19-13.0-1270-A	246	284	310	236	272	297
1×19-14.5-1270-B	283	327	356	271	313	341
1×19-16.0-1370-B	321	370	404	308	355	387
1×19-17.5-1370-B	361	415	452	346	398	434
注：镀锌钢绞线允许温度取的 125 ℃，其余计算条件同表 B.1。						

表 B.7 典型铝包钢绞线的最大允许融冰电流



地线型号	最大允许融冰电流					
	A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
JLB14-50-7	163	191	209	151	177	194
JLB14-80-7	219	257	282	203	238	261
JLB14-150-19	326	380	417	302	353	387
JLB14-185-19	372	434	476	344	402	441
JLB14-210-19	406	474	519	376	439	482
JLB20A-50-7	196	230	252	182	213	234
JLB20A-80-7	264	309	339	245	287	315
JLB20A-100-19	308	360	395	285	334	366
JLB20A-120-19	346	404	443	320	375	411
JLB20A-150-19	393	458	503	364	425	466
JLB27-50-7	226	265	291	210	246	270

表 B.7 典型铝包钢绞线的最大允许融冰电流 (续)

地线型号	最大允许融冰电流 A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
JLB27-55-7	245	287	315	227	266	293
JLB27-150-19	452	528	579	419	490	538
JLB27-50-7	257	302	331	239	280	307
JLB27-55-7	404	472	518	374	438	481
JLB27-150-19	275	322	354	255	299	329
JLB35-50-7	371	434	476	344	402	442
JLB35-100-19	416	486	534	385	451	495
JLB40-50-7	432	505	554	400	468	514
JLB40-80-7	485	567	622	449	526	577
JLB40-95-7	551	643	705	510	596	654
JLB40-100-19	629	734	804	582	680	746
JLB40-120-19	163	191	209	151	177	194
JLB40-150-19	219	257	282	203	238	261
JLB40-185-19	326	380	417	302	353	387
注 1: 铝包钢绞线允许温度取 80 ℃, 其余计算条件同表 B.1。						
注 2: 大跨越段绞线允许温度取 100 ℃。						

表 B.8 常用光纤复合地线的最大允许融冰电流

光纤复合地线型号	最大允许融冰电流 A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
OPGW-9-40-1	187	218	239	175	205	225
OPGW-10-50-1	204	238	261	191	224	245
OPGW-11-70-1	253	295	324	237	277	303
OPGW-11-70-2	345	402	441	323	377	414
OPGW-13-90-1	303	353	387	284	331	363
OPGW-13-90-2	416	485	532	390	455	499
OPGW-13-100-1	311	363	397	292	340	373
OPGW-13-100-2	429	500	548	402	469	514
OPGW-14-110-1	335	390	427	314	366	401

表 B.8 常用光纤复合地线的最大允许融冰电流（续）

光纤复合地线型号	最大允许融冰电流					
	A					
	环境温度 5 ℃			环境温度 15 ℃		
	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s	风速 1 m/s	风速 2 m/s	风速 3 m/s
OPGW-14-110-2	343	399	437	321	374	410
OPGW-14-110-3	483	563	617	453	528	578
OPGW-14.6-120-1	352	409	448	329	384	420
OPGW-14.6-120-2	416	484	531	390	454	498
OPGW-14.6-120-3	476	554	607	446	520	569
OPGW-15-120-1	358	416	456	335	390	428
OPGW-15-120-2	428	499	546	401	468	512
OPGW-15-120-3	493	574	629	462	538	590
OPGW-15-130-1	368	428	469	344	401	439
OPGW-15-130-2	441	514	562	413	481	527
OPGW-15-130-3	493	574	629	462	538	590
OPGW-16-140-1	393	457	501	368	429	469
OPGW-16-140-2	472	550	602	442	515	564
OPGW-16-140-3	569	662	725	533	621	680
OPGW-17-150-1	412	480	525	386	450	493
OPGW-17-150-2	493	574	628	462	538	589
OPGW-17-150-3	556	647	708	521	607	664
OPGW-17-150-4	399	465	509	374	435	477
OPGW-17-150-5	476	554	607	446	519	569
OPGW-18-170-1	442	514	562	414	481	527
OPGW-18-170-2	446	518	567	418	486	532
OPGW-18-180-1	386	449	491	362	421	461
OPGW-18-180-2	463	539	590	434	505	553
OPGW-18-180-3	554	644	705	519	603	661
OPGW-18-180-4	619	720	788	580	675	739
注 1：OPGW 允许温度取的 90 ℃，其余计算条件同表 B.1。						
注 2：OPGW 光缆最大允许融冰电流与光纤芯数无关，同截面时不同芯数的 OPGW 最大允许融冰电流相同。						



附 录 C
(资料性)

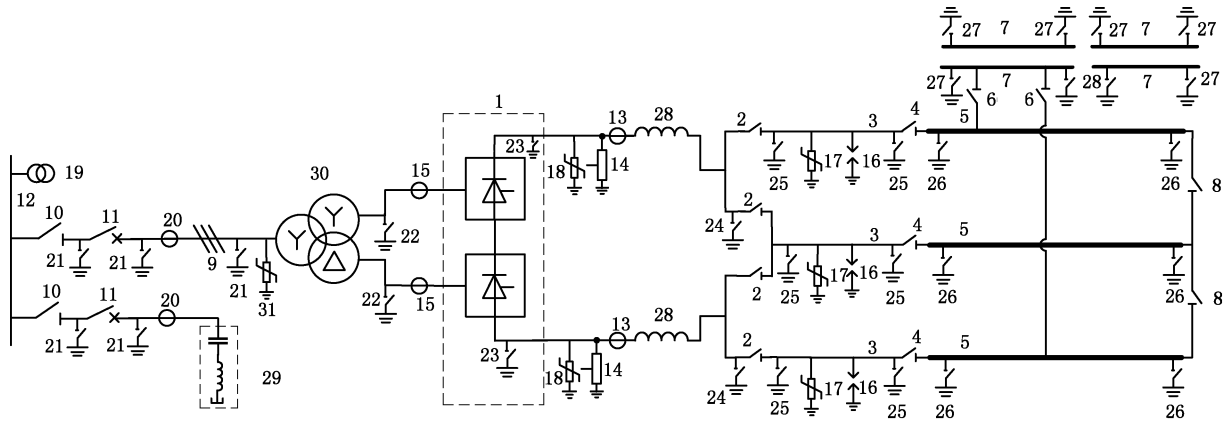
直流融冰系统电气主接线及典型直流电压可融导线和地线最大长度

C.1 直流融冰系统电气主接线

C.1.1 线路停电导线和地线融冰电气主接线

电网换相(12脉动)直流融冰系统电气主接线(含建议测量点及过电压保护设备)见图 C.1,电网换相(6脉动)直流融冰系统电气主接线见 C.2,模块化多电平直流融冰系统电气主接线见图 C.3,采用全控型器件的电流源直流融冰系统电气主接线图 C.4。

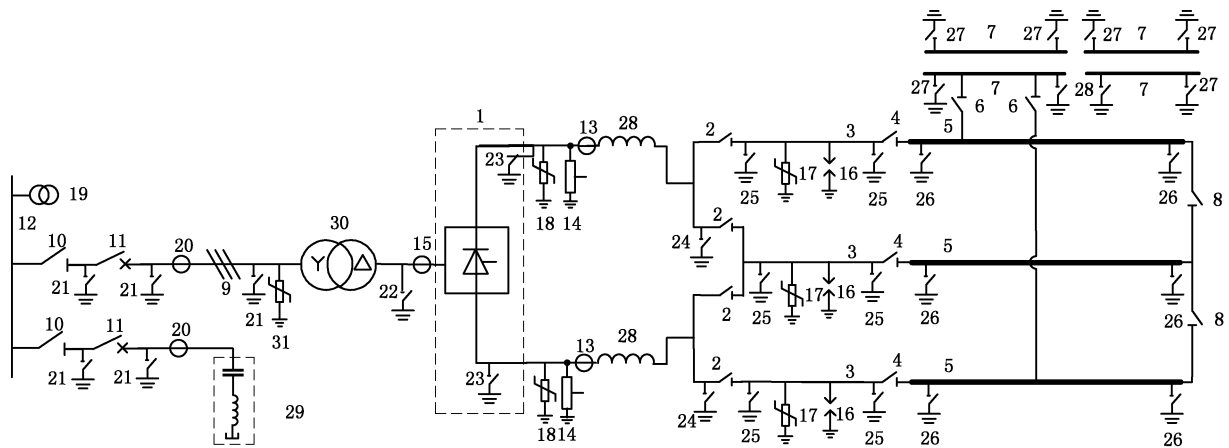
图 C.1、图 C.2、图 C.3 和图 C.4 所示为单回交流线路停电导线和地线融冰电气主接线图。单回直流线路停电地线融冰系统电气主接线、同塔双回交流线路两回停电导线和地线融冰电气主接线、同塔双回直流线路全停电地线融冰电气主接线与此类似。



标引序号说明:

- | | |
|--------------------------|-------------------|
| 1 —— 电网换相换流器; | 17 —— 融冰母线避雷器; |
| 2 —— 融冰母线装置侧隔离开关(4台或6台); | 18 —— 直流极母线避雷器; |
| 3 —— 融冰母线; | 19 —— 电压互感器; |
| 4 —— 融冰母线线路侧隔离开关; | 20 —— 电流互感器; |
| 5 —— 融冰导线; | 21 —— 交流接地开关; |
| 6 —— 导线和地线联络隔离开关; | 22 —— 换流器交流侧接地开关; |
| 7 —— 融冰地线(或 OPGW); | 23 —— 换流器直流侧接地开关; |
| 8 —— 导线短接隔离开关; | 24 —— 直流极母线接地开关; |
| 9 —— 交流进线; | 25 —— 融冰母线接地开关; |
| 10 —— 交流隔离开关; | 26 —— 融冰线路接地开关; |
| 11 —— 交流断路器; | 27 —— 地线接地开关; |
| 12 —— 交流母线; | 28 —— 平波电抗器; |
| 13 —— 直流电流测量装置; | 29 —— 交流滤波器; |
| 14 —— 直流电压测量装置; | 30 —— 换流变压器; |
| 15 —— 电流互感器; | 31 —— 交流进线避雷器。 |
| 16 —— 直流侧保护间隙; | |

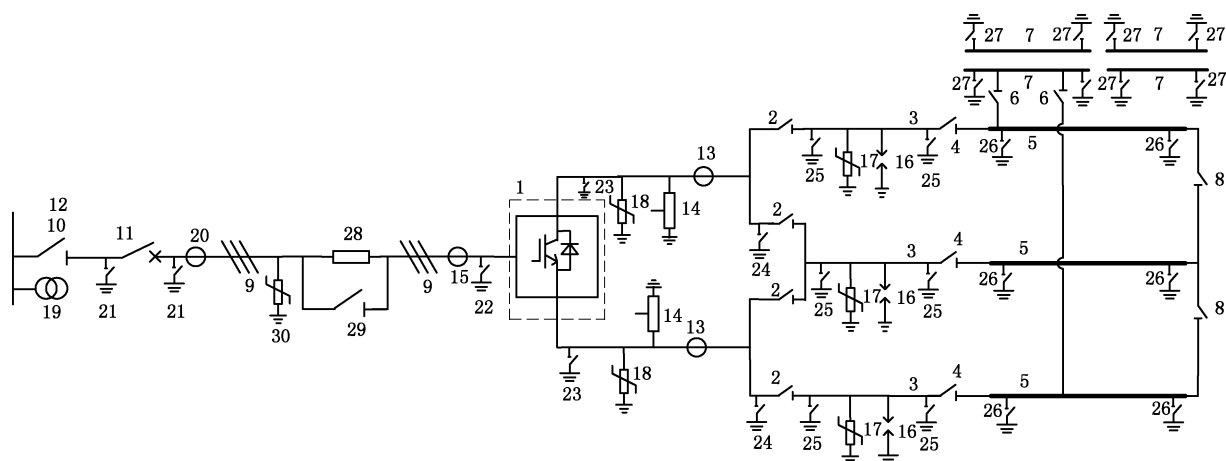
图 C.1 电网换相(12脉动)直流融冰系统电气主接线



标引序号说明：

- | | |
|--------------------------|-------------------|
| 1 —— 电网换相换流器； | 17 —— 融冰母线避雷器； |
| 2 —— 融冰母线装置侧隔离开关(4台或6台)； | 18 —— 直流极母线避雷器； |
| 3 —— 融冰母线； | 19 —— 电压互感器； |
| 4 —— 融冰母线线路侧隔离开关； | 20 —— 电流互感器； |
| 5 —— 融冰导线； | 21 —— 交流接地开关； |
| 6 —— 导线和地线联络隔离开关； | 22 —— 换流器交流侧接地开关； |
| 7 —— 融冰地线(或OPGW)； | 23 —— 换流器直流侧接地开关； |
| 8 —— 导线短接隔离开关； | 24 —— 直流极母线接地开关； |
| 9 —— 交流进线； | 25 —— 融冰母线接地开关； |
| 10 —— 交流隔离开关； | 26 —— 融冰线路接地开关； |
| 11 —— 交流断路器； | 27 —— 地线接地开关； |
| 12 —— 交流母线； | 28 —— 平波电抗器； |
| 13 —— 直流电流测量装置； | 29 —— 交流滤波器； |
| 14 —— 直流电压测量装置； | 30 —— 换流变压器； |
| 15 —— 电流互感器； | 31 —— 交流进线避雷器。 |
| 16 —— 直流侧保护间隙； | |

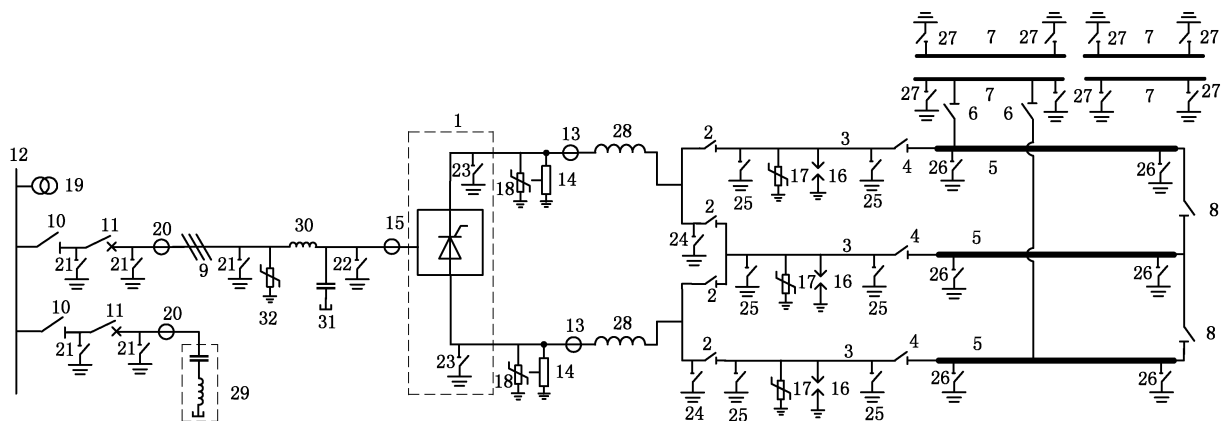
图 C.2 电网换相(6脉动)直流融冰系统电气主接线



标引序号说明：

- | | |
|-----------------------------|--------------------|
| 1 —— 模块化多电平换流器； | 16 —— 直流侧保护间隙； |
| 2 —— 融冰母线装置侧隔离开关(4 台或 6 台)； | 17 —— 融冰母线避雷器； |
| 3 —— 融冰母线； | 18 —— 直流极母线避雷器； |
| 4 —— 融冰母线线路侧隔离开关； | 19 —— 电压互感器； |
| 5 —— 融冰导线； | 20 —— 电流互感器； |
| 6 —— 导线和地线联络隔离开关； | 21 —— 交流接地开关； |
| 7 —— 融冰地线(或 OPGW)； | 22 —— 换流器交流侧接地开关； |
| 8 —— 导线短接隔离开关； | 23 —— 换流器直流侧接地开关； |
| 9 —— 交流进线； | 24 —— 直流极母线接地开关； |
| 10 —— 交流隔离开关； | 25 —— 融冰母线接地开关； |
| 11 —— 交流进线断路器； | 26 —— 融冰线路接地开关； |
| 12 —— 交流母线； | 27 —— 地线接地开关； |
| 13 —— 直流电流测量装置； | 28 —— 启动电阻器； |
| 14 —— 直流电压测量装置； | 29 —— 启动电阻器旁路隔离开关； |
| 15 —— 电流互感器； | 30 —— 交流进线避雷器。 |

图 C.3 模块化多电平直流融冰系统电气主接线



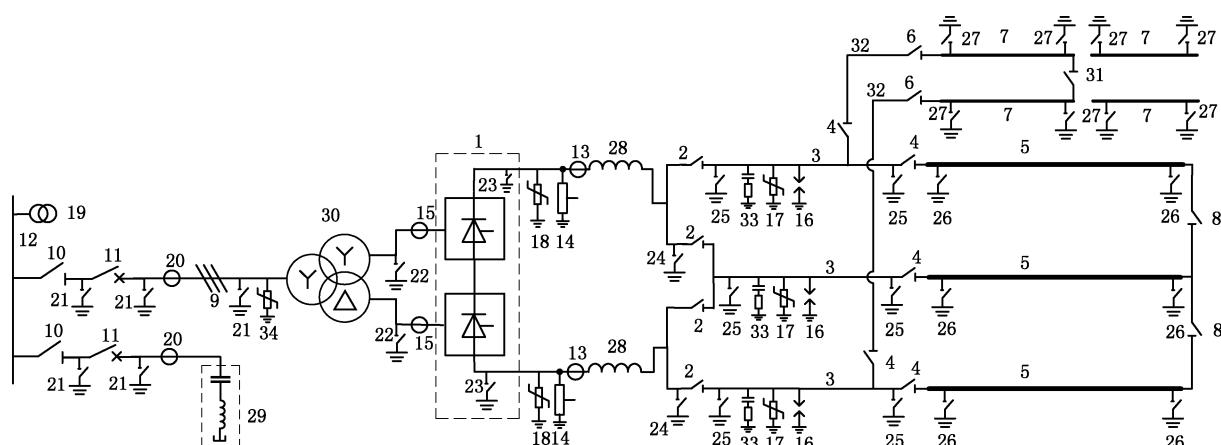
标引序号说明：

- | | |
|--------------------------|-------------------|
| 1 —— 电流源型换流器； | 17 —— 融冰母线避雷器； |
| 2 —— 融冰母线装置侧隔离开关(4台或6台)； | 18 —— 直流极母线避雷器； |
| 3 —— 融冰母线； | 19 —— 电压互感器； |
| 4 —— 融冰母线线路侧隔离开关； | 20 —— 电流互感器； |
| 5 —— 融冰导线； | 21 —— 交流接地开关； |
| 6 —— 导线和地线联络隔离开关； | 22 —— 换流器交流侧接地开关； |
| 7 —— 融冰地线(或OPGW)； | 23 —— 换流器直流侧接地开关； |
| 8 —— 导线短接隔离开关； | 24 —— 直流极母线接地开关； |
| 9 —— 交流进线； | 25 —— 融冰母线接地开关； |
| 10 —— 交流隔离开关； | 26 —— 融冰线路接地开关； |
| 11 —— 交流断路器； | 27 —— 地线接地开关； |
| 12 —— 交流母线； | 28 —— 平波电抗器； |
| 13 —— 直流电流测量装置； | 29 —— 交流滤波器； |
| 14 —— 直流电压测量装置； | 30 —— 电抗器； |
| 15 —— 电流互感器； | 31 —— 电容器； |
| 16 —— 直流侧保护间隙； | 32 —— 交流进线避雷器。 |

图 C.4 采用全控型器件的电流源直流融冰系统电气主接线

C.1.2 线路不停电地线直流融冰系统电气主接线

图 C.5 所示为以电网换相直流融冰装置为例的单回交流线路不停电地线融冰电气主接线图。单回直流线路不停电地线融冰、同塔双回交流线路不停电地线融冰、同塔双回直流线路不停电地线融冰电气主接线与此类似。



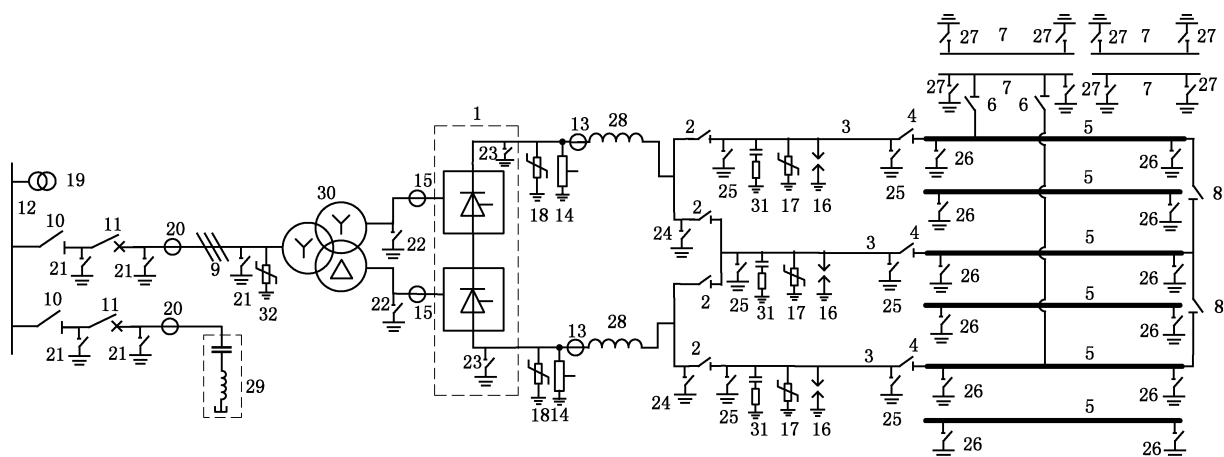
标引序号说明：

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| 1 —— 电网换相换流器； | 18 —— 直流极母线避雷器； |
| 2 —— 融冰母线装置侧隔离开关(4 台或 6 台)； | 19 —— 电压互感器； |
| 3 —— 融冰母线； | 20 —— 电流互感器； |
| 4 —— 融冰母线线路侧隔离开关； | 21 —— 交流接地开关； |
| 5 —— 导线； | 22 —— 换流器交流侧接地开关； |
| 6 —— 地线和引接线联络隔离开关； | 23 —— 换流器直流侧接地开关； |
| 7 —— 地线(或 OPGW)； | 24 —— 直流极母线接地开关； |
| 8 —— 导线短接隔离开关； | 25 —— 融冰母线接地开关； |
| 9 —— 交流进线； | 26 —— 融冰线路接地开关； |
| 10 —— 交流隔离开关； | 27 —— 地线接地开关； |
| 11 —— 交流断路器； | 28 —— 平波电抗器； |
| 12 —— 交流母线； | 29 —— 交流滤波器； |
| 13 —— 直流电流测量装置； | 30 —— 换流变压器； |
| 14 —— 直流电压测量装置； | 31 —— 地线短接隔离开关； |
| 15 —— 电流互感器； | 32 —— 地线融冰引接线； |
| 16 —— 直流侧保护间隙； | 33 —— 电阻-电容交流感应电压抑制电路； |
| 17 —— 融冰母线避雷器； | 34 —— 交流进线避雷器。 |

图 C.5 交流线路不停电地线融冰电气主接线(以电网换相直流融冰装置为例)

C.1.3 同塔双回交流线路中一回停电导线和地线融冰电气主接线

图 C.6 所示为以电网换相直流融冰装置为例的同塔双回交流线路中一回停电导线和地线融冰线图。



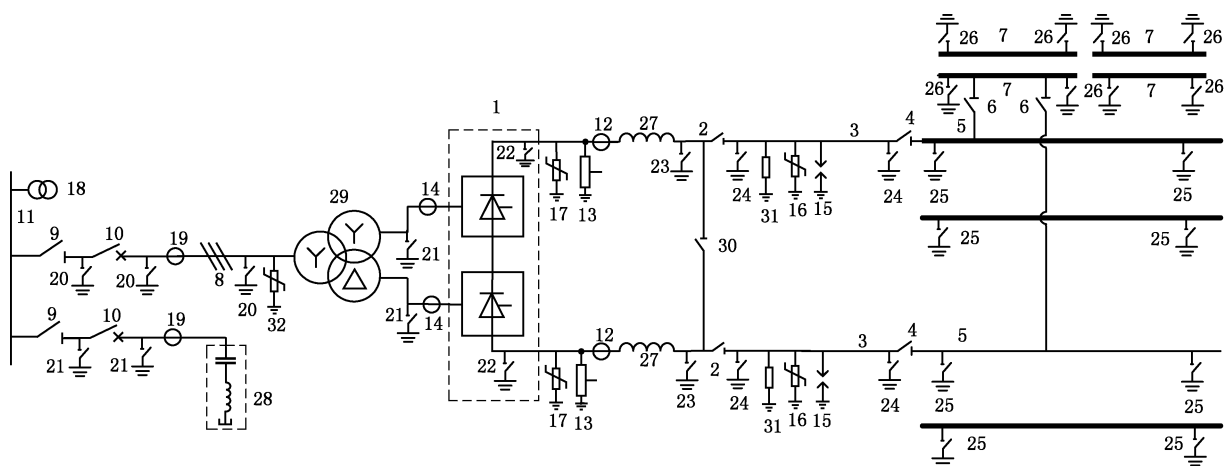
标引序号说明：

- | | |
|--------------------------|------------------------|
| 1 —— 电网换相换流器； | 17 —— 融冰母线避雷器； |
| 2 —— 融冰母线装置侧隔离开关(4台或6台)； | 18 —— 直流极母线避雷器； |
| 3 —— 融冰母线； | 19 —— 电压互感器； |
| 4 —— 融冰母线线路侧隔离开关； | 20 —— 电流互感器； |
| 5 —— 融冰导线； | 21 —— 交流接地开关； |
| 6 —— 导线和地线联络隔离开关； | 22 —— 换流器交流侧接地开关； |
| 7 —— 融冰地线(或OPGW)； | 23 —— 换流器直流侧接地开关； |
| 8 —— 导线短接隔离开关； | 24 —— 直流极母线接地开关； |
| 9 —— 交流进线； | 25 —— 融冰母线接地开关； |
| 10 —— 交流隔离开关； | 26 —— 融冰线路接地开关； |
| 11 —— 交流断路器； | 27 —— 地线接地开关； |
| 12 —— 交流母线； | 28 —— 平波电抗器； |
| 13 —— 直流电流测量装置； | 29 —— 交流滤波器； |
| 14 —— 直流电压测量装置； | 30 —— 换流变压器； |
| 15 —— 电流互感器； | 31 —— 电阻-电容交流感应电压抑制电路； |
| 16 —— 直流侧保护间隙； | 32 —— 交流进线避雷器。 |

图 C.6 同塔双回交流线路中一回停电导线和地线融冰电气主接线(以电网换相直流融冰装置为例)

C.1.4 同塔双回直流线路中停电一回地线融冰电气主接线

图 C.7 所示为以电网换相直流融冰装置为例的同塔双回直流线路中一回停电地线直流融冰系统接线图。



标引序号说明:

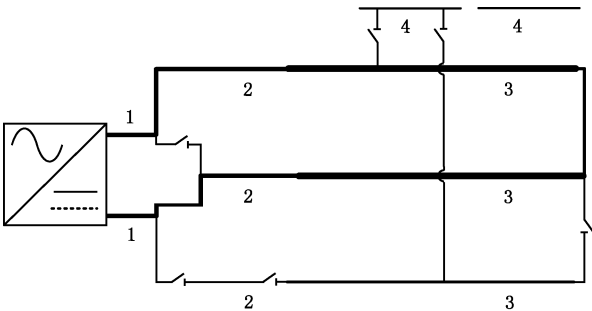
- | | |
|------------------|------------------|
| 1 ——电网换相换流器； | 17——直流极母线避雷器； |
| 2 ——融冰母线装置侧隔离开关； | 18——电压互感器； |
| 3 ——融冰母线； | 19——电流互感器； |
| 4 ——融冰母线线路侧隔离开关； | 20——交流接地开关； |
| 5 ——直流极导线； | 21——换流器交流侧接地开关； |
| 6 ——导线和地线联络隔离开关； | 22——换流器直流侧接地开关； |
| 7 ——地线(或 OPGW)； | 23——直流极母线接地开关； |
| 8 ——交流进线； | 24——融冰母线接地开关； |
| 9 ——交流隔离开关； | 25——融冰线路接地开关； |
| 10 ——交流断路器； | 26——地线接地开关； |
| 11 ——交流母线； | 27——平波电抗器； |
| 12 ——直流电流测量装置； | 28——交流滤波器； |
| 13 ——直流电压测量装置； | 29——换流变压器； |
| 14 ——电流互感器； | 30——零功率试验短接隔离开关； |
| 15 ——直流侧保护间隙； | 31——直流感应电压抑制电路； |
| 16 ——融冰母线避雷器； | 32——交流进线避雷器。 |

图 C.7 同塔双回直流线路中一回停电地线融冰电气主接线(以电网换相直流融冰装置为例)

C.2 各融冰接线方式的典型直流电压可融导线和地线最大长度

C.2.1 两相导线串联接入直流融冰装置

两相导线串联接入直流融冰装置如图 C.8 所示,典型直流电压可融导线最大长度如表 C.1 所示。



标引序号说明：
1——直流融冰装置直流出线；2——融冰母线；3——待融冰导线；4——地线。

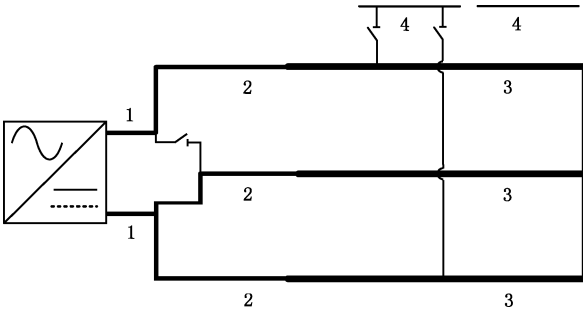
图 C.8 两相导线串联接入直流融冰装置(以 A 相和 B 相导线串联融冰为例)

表 C.1 两相导线串联接入直流融冰装置时典型直流电压下的可融冰导线最大长度

融冰接线	导线型号		最小融冰电流 A	设计融冰电流 A	20℃时 直流电阻 Ω/km	10 kV 融冰 长度 km	20 kV 融冰 长度 km	30 kV 融冰 长度 km	40 kV 融冰 长度 km	50 kV 融冰 长度 km
两相 导线 串联	500 kV	4×JL/G1A-630/45	4 698	5 168	0.011 5	84	169	253	337	422
		6×LGJ-300/70	4 356	4 792	0.015 8	66	132	199	265	331
		4×JL/G1A-400/50	3 448	3 793	0.018 1	73	146	219	291	364
		4×JL/G1A-500/45	3 952	4 347	0.014 8	78	156	234	311	389
	220 kV 及以下	2×JL/G1A-400/50	1 724	1 896	0.036 2	73	146	219	291	364
		2×JL/G1A-500/45	1 976	2 174	0.029 6	78	156	234	311	389
		2×JL/G1A-240/40	1 452	1 597	0.060 5	52	104	155	207	259
		JL/G1A-185/45	512	563	0.156 4	57	114	170	227	284

C.2.2 两相导线并联后与另一相串联接入直流融冰装置

两相导线并联后与另一相串联接入直流融冰装置如图 C.9 所示,典型直流电压可融导线最大长度如表 C.2 所示。



标引序号说明：
1——直流融冰装置直流出线；
2——融冰母线；
3——待融冰导线；
4——地线。

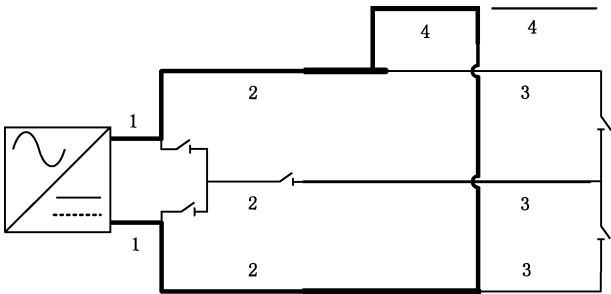
图 C.9 两相导线并联后与另一相导线串联接入直流融冰装置(以 B 相和 C 相并联后与 A 相串联融冰为例)

表 C.2 两相导线并联后与另一相串联接入直流融冰装置时典型直流电压的可融冰导线最大长度

融冰接线方式	导线型号		最小融冰电流 A	设计融冰电流 A	20℃时直流电阻 Ω/km	10 kV 融冰长度 km	20 kV 融冰长度 km	30 kV 融冰长度 km	40 kV 融冰长度 km	50 kV 融冰长度 km
两相导线并联后与另一相串联	500 kV	4×JL/G1A-630/45	4 698	5 168	0.011 5	112	225	337	450	562
		6×LGJ-300/70	4 390	4 829	0.015 8	86	172	258	344	430
		4×JL/G1A-400/50	3 434	3 778	0.018 1	98	195	293	391	488
		4×JL/G1A-500/45	3 936	4 330	0.014 8	104	208	313	417	521
	220 kV 及以下	2×JL/G1A-400/50	1 989	2 188	0.036 2	98	197	295	393	491
		2×JL/G1A-500/45	1 738	1 912	0.029 6	96	193	289	386	482
		2×JL/G1A-240/40	1 167	1 284	0.060 5	86	172	258	344	430
		JL/G1A-185/45	515	567	0.156 4	72	144	217	289	361

C.2.3 单段地线通过导线接入直流融冰装置

单段地线通过导线接入直流融冰装置如图 C.10 所示,典型直流电压可融导线最大长度如表 C.3 所示。



标引序号说明：
1——直流融冰装置直流出线；2——融冰母线；3——待融冰导线；4——地线。

图 C.10 单段地线通过导线接入直流融冰装置(以待融冰地线通过 A 相和 C 相导线接入直流融冰装置为例)

表 C.3 单段地线通过导线接入直流融冰装置时典型直流电压的可融冰导线最大长度

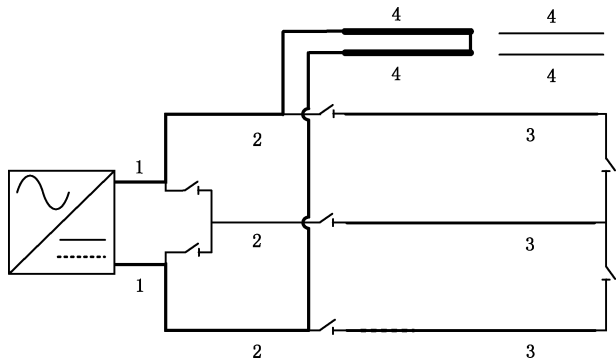
融冰接线方式	地线型号		最小融冰电流 A	设计融冰电流 A	20℃时直流电阻 Ω/km	10 kV 融冰长度 km	20 kV 融冰长度 km	30 kV 融冰长度 km	40 kV 融冰长度 km	50 kV 融冰长度 km
单段地线通过导线接入直流融冰装置	普通地线	JLB20A-100-19	187	206	0.855 8	57	113	170	227	284
		JLB20A-150-19	243	268	0.583 0	64	128	192	256	320
		JLB35-100-19	299	329	0.497 1	61	122	183	245	306
		JLB40-100-19	263	289	0.434 9	79	159	238	318	397
		JLB40-150-19	341	376	0.296 3	90	180	270	359	449
		JLB40-185-19	394	433	0.240 0	96	192	288	385	481

表 C.3 单段地线通过导线接入直流融冰装置时典型直流电压的可融冰导线最大长度（续）

融冰 接线 方式	地线型号		最小 融冰 电流 A	设计 融冰 电流 A	20 ℃时 直流电阻 Ω/km	10 kV 融冰 长度 km	20 kV 融冰 长度 km	30 kV 融冰 长度 km	40 kV 融冰 长度 km	50 kV 融冰 长度 km
单段地 线通过 导线接 入直流 融冰 装置	OPGW	OPGW-13-100-1	181	199	0.937 1	54	108	162	216	270
		OPGW-14.6-120-1	206	227	0.773 2	57	115	172	229	287
		OPGW-17-150-1	244	268	0.603 0	62	124	186	248	310
		OPGW-17-150-5	341	375	0.452 7	59	118	178	237	296
		OPGW-18-180-1	231	254	0.726 9	55	109	164	219	273
		OPGW-18-180-4	370	407	0.285 3	88	176	263	351	439

C.2.4 两平行地线段串联后直接接入直流融冰装置

两平行地线段串联后直接接入直流融冰装置如图 C.11 所示,典型直流电压可融地线最大长度如表 C.4 所示。



标引序号说明：
1——直流融冰装置直流出线；
2——融冰母线；
3——待融冰导线；
4——地线。

图 C.11 两平行地线段串联后直接接入直流融冰装置

表 C.4 两平行地线段串联后直接接入直流融冰装置时典型直流电压的可融冰导线最大长度

融冰 接线 方式	地线型号		最小 融冰 电流 A	设计 融冰 电流 A	20 ℃时 直流电阻 Ω/km	10 kV 融冰 长度 km	20 kV 融冰 长度 km	30 kV 融冰 长度 km	40 kV 融冰 长度 km	50 kV 融冰 长度 km
两平行 地线段 串联后 直接接 入直流 融冰 装置	普通地线	JLB20A-100-19	187	206	0.855 8	28	57	85	113	142
		JLB20A-150-19	243	268	0.583 0	32	64	96	128	160
		JLB35-100-19	299	329	0.497 1	31	61	92	122	153
		JLB40-100-19	263	289	0.434 9	40	79	119	159	199
		JLB40-150-19	341	376	0.296 3	45	90	135	180	225
		JLB40-185-19	394	433	0.240 0	48	96	144	192	240

表 C.4 两平行地线段串联后直接接入直流融冰装置时典型直流电压的可融冰导线最大长度（续）

融冰 接线 方式	地线型号	最小 融冰 电流 A	设计 融冰 电流 A	20 ℃时 直流电阻 Ω/km	10 kV 融冰 长度 km	20 kV 融冰 长度 km	30 kV 融冰 长度 km	40 kV 融冰 长度 km	50 kV 融冰 长度 km
两平行 地线段 串联后 直接接 入直流 融冰 装置	OPGW-13-100-1	181	199	0.937 1	27	54	81	108	135
	OPGW-14,6-120-1	206	227	0.770 0	29	57	86	115	143
	OPGW-17-150-1	244	268	0.603 0	31	62	93	124	155
	OPGW-17-150-5	341	375	0.452 7	30	59	89	118	148
	OPGW-18-180-1	231	254	0.726 9	27	55	82	109	137
	OPGW-18-180-4	370	407	0.285 3	44	88	132	176	219

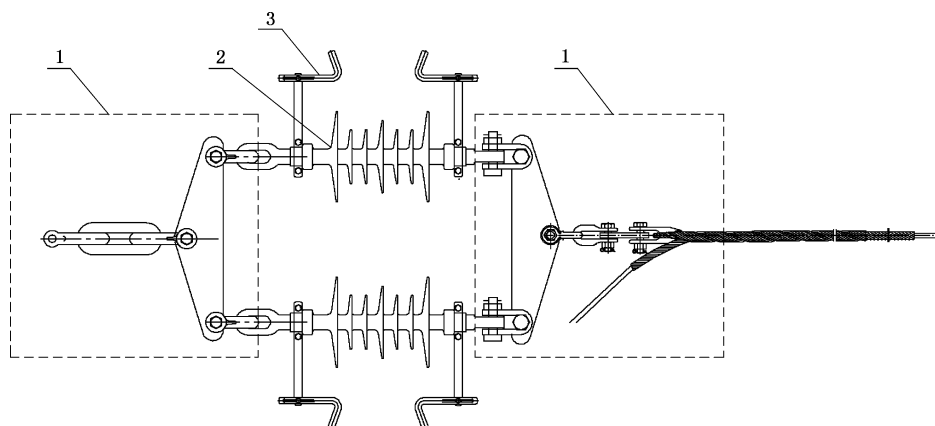
附录 D

(资料性)

绝缘地线连接及绝缘子与金具

D.1 耐张绝缘子串

绝缘地线的耐张绝缘子串常见型式见图 D.1。



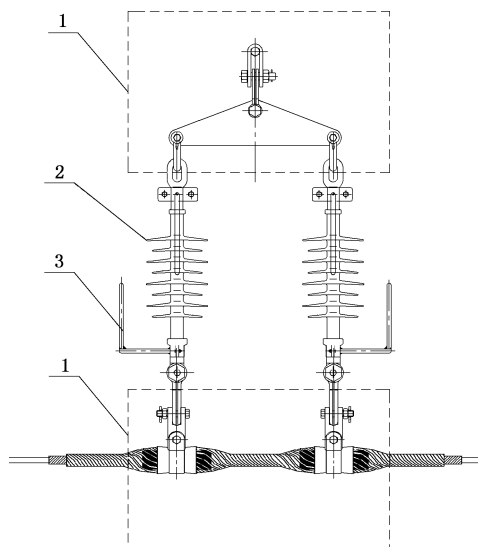
标引序号说明：

1——金具；2——绝缘子；3——保护间隙。

图 D.1 耐张绝缘子串

D.2 悬垂绝缘子串

绝缘地线的悬垂绝缘子串常见型式图 D.2。



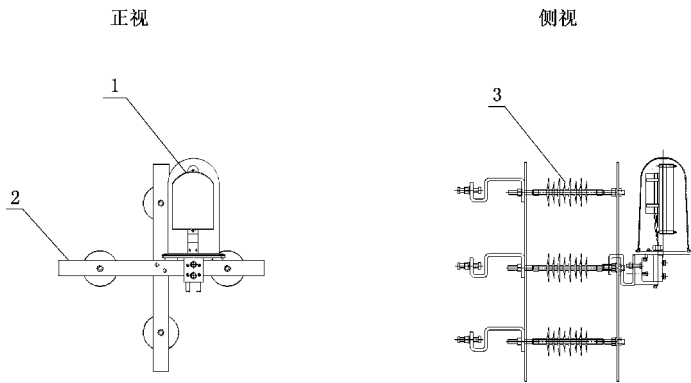
标引序号说明：

1——金具；2——绝缘子；3——保护间隙。

图 D.2 悬垂绝缘子串

D.3 光缆接头盒

光纤复合架空地线的光缆接头盒常见型式见图 D.3。

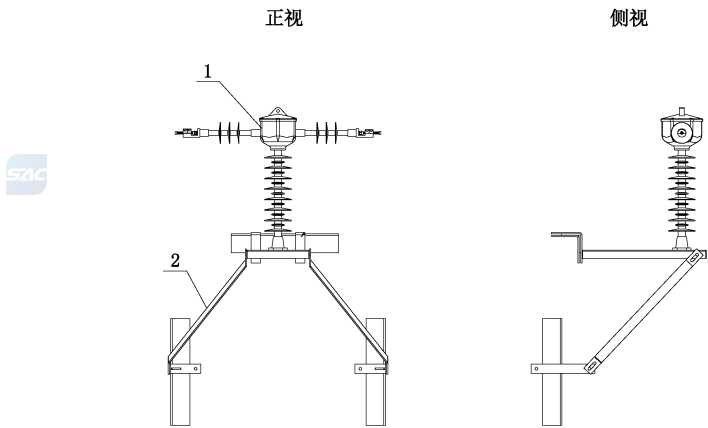


标引序号说明：
1——接头盒；
2——固定支架；
3——支柱绝缘子。

图 D.3 光缆接头盒

D.4 光缆光电分离接头盒

光纤复合架空地线的中间型光电分离接头盒见图 D.4,终端型光电分离接头盒见图 D.5。



标引序号说明：
1——光电分离接头盒；
2——固定支架。

图 D.4 中间型光电分离接头盒

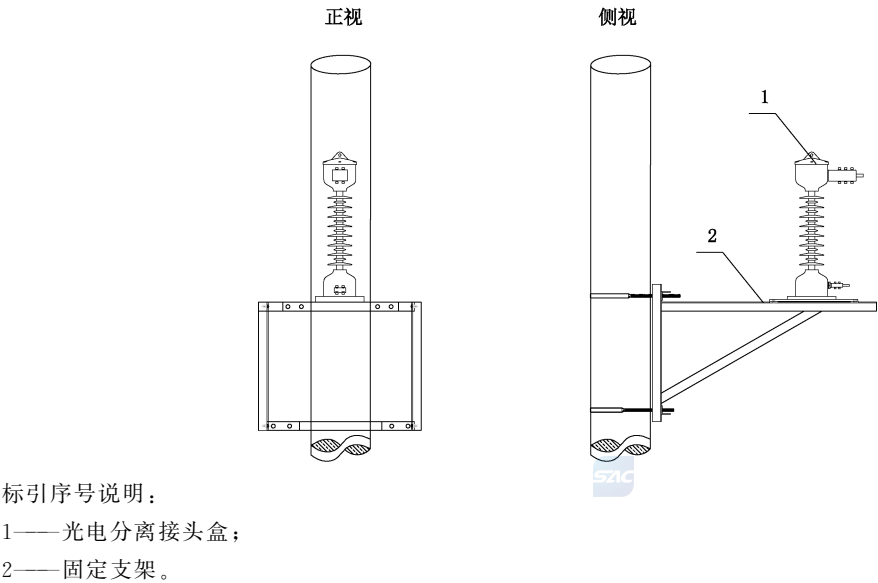


图 D.5 终端型光电分离接头盒

D.5 架空地线非融冰分段点耐张塔地线导通引流接线

非融冰分段点耐张塔两侧地线导通下引流线接线见图 D.6,上引流线接线见图 D.7。

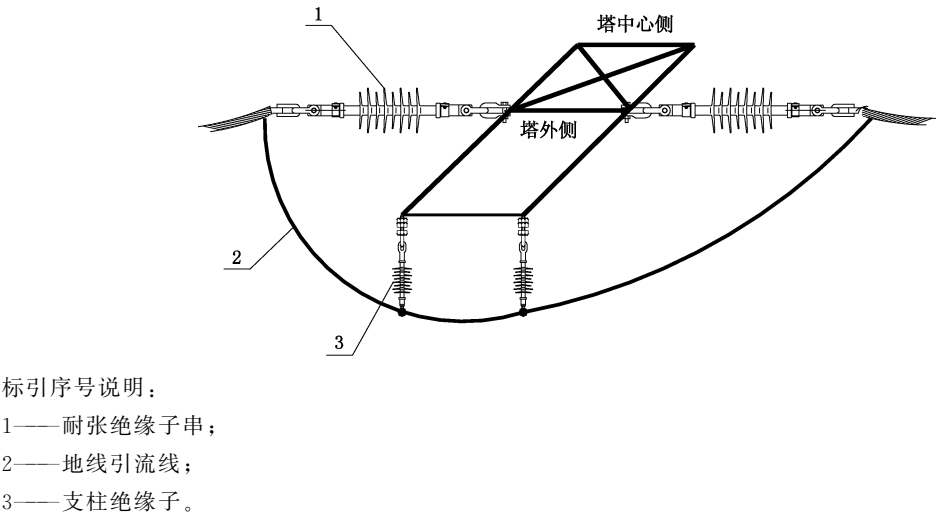
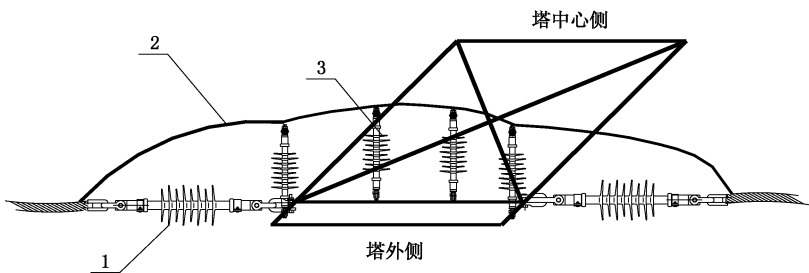


图 D.6 绝缘地线导通下引流线接线

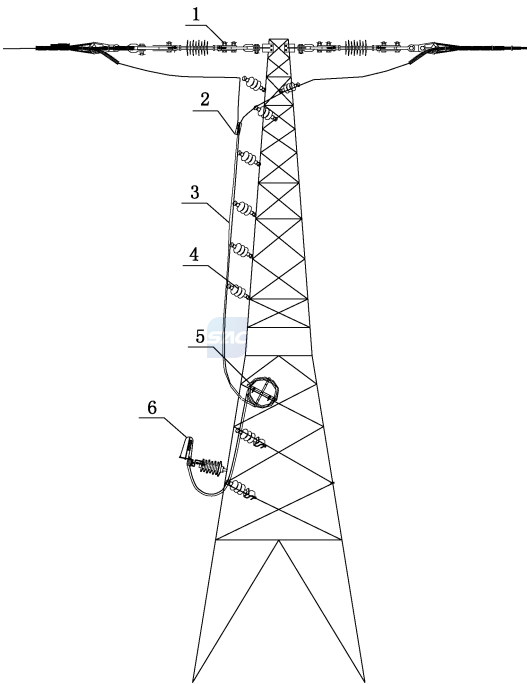


标引序号说明：
1——耐张绝缘子串；
2——地线引流线；
3——支柱绝缘子。

图 D.7 绝缘地线导通上引流线接线

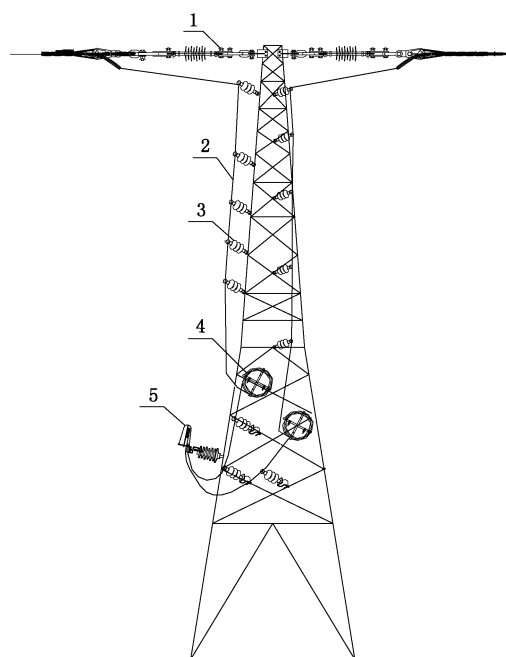
D.6 耐张塔光纤复合地线接线

非融冰分段点耐张塔光纤复合地线接线见图 D.8，融冰分段点耐张塔光纤复合地线接线见图 D.9。



标引序号说明：
1——耐张绝缘子串；
2——并沟线夹；
3——地线引下线；
4——地线绝缘引下线夹；
5——余缆架；
6——接头盒。

图 D.8 非融冰分段点耐张塔光纤复合地线接线



标引序号说明：

- 1——耐张绝缘子串；
- 2——地线引下线；
- 3——地线绝缘引下线夹；
- 4——余缆架；
- 5——光电分离接头盒。

图 D.9 融冰分段点耐张塔光纤复合地线接线

附录 E
(资料性)

直流融冰装置与融冰线路的连接

E.1 站内融冰隔离开关、接地开关及其连接

E.1.1 融冰母线装置侧隔离开关及其连接

融冰母线装置侧隔离开关通常采用图 E.1 和图 E.2 两种型式。

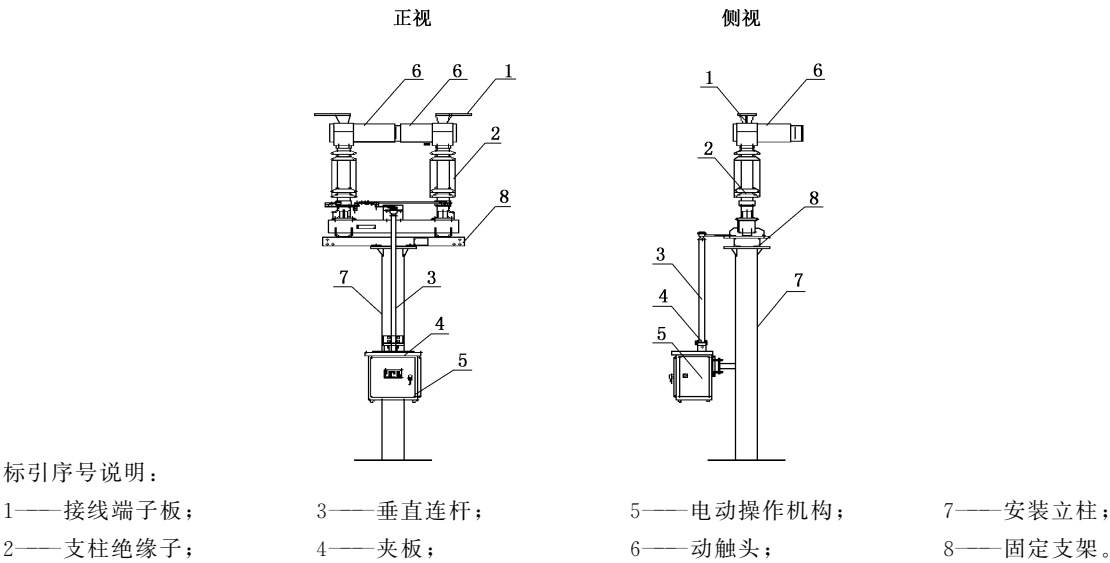


图 E.1 双柱水平旋转式隔离开关

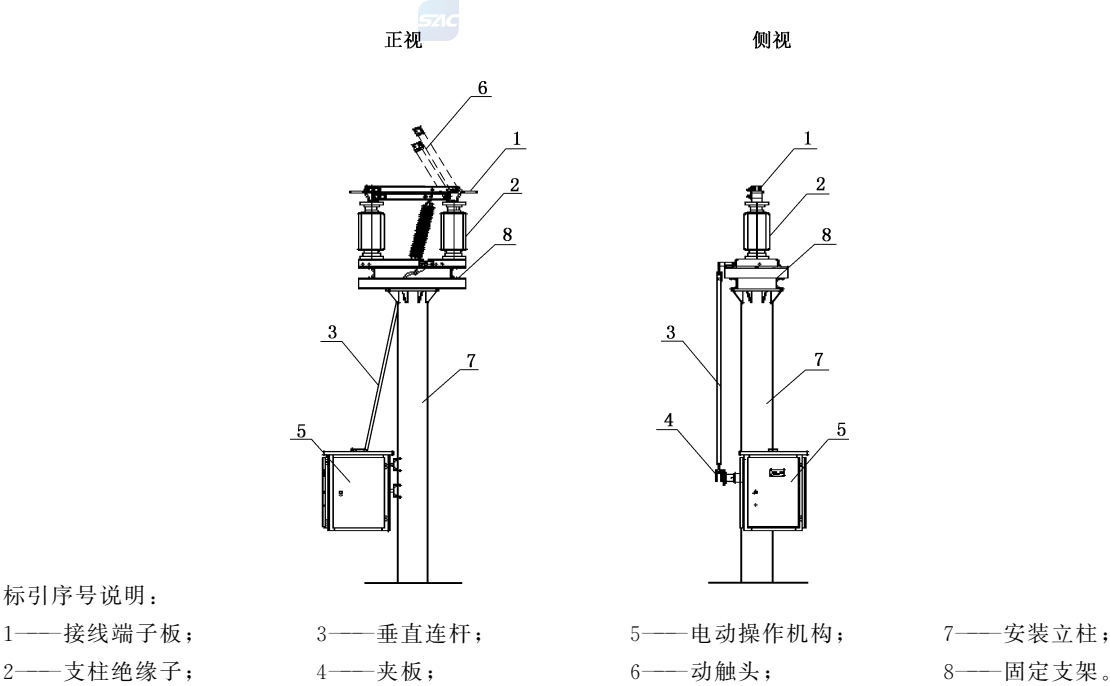
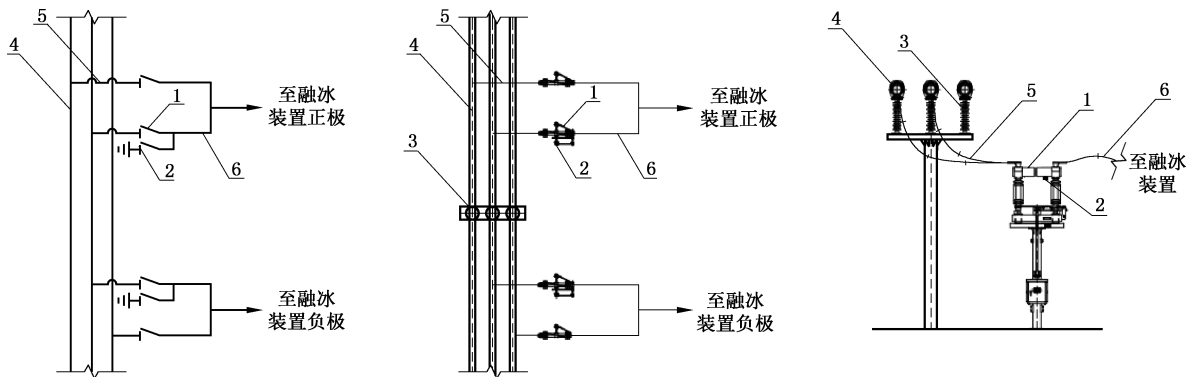


图 E.2 双柱垂直旋转式隔离开关

融冰母线装置侧采用四台隔离开关与融冰母线连接的图见图 E.3,采用六台隔离开关与融冰母线连接的图见图 E.4。

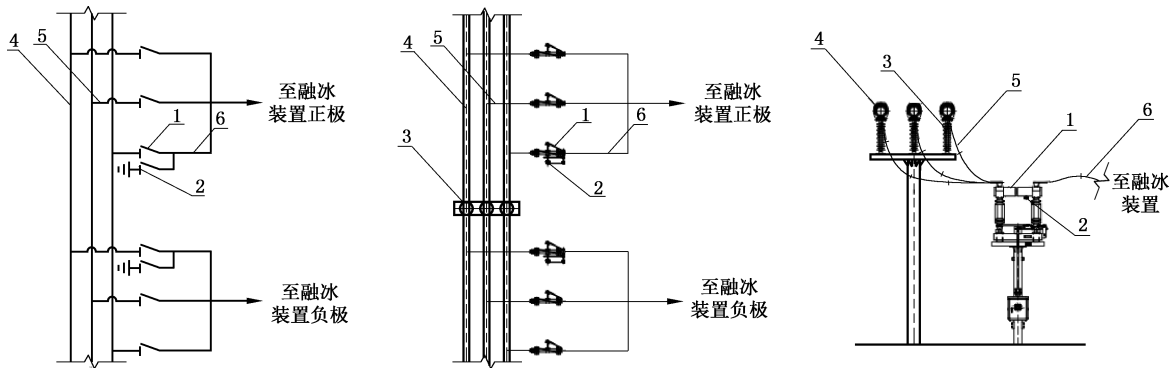


标引序号说明：

- 1——融冰母线装置侧隔离开关；
- 2——极母线接地开关；
- 3——支柱绝缘子；
- 4——融冰母线；
- 5——融冰母线侧连接导体；
- 6——直流融冰装置侧连接导体。

注：直流极母线接地开关用于直流融冰装置检修接地,根据需要单独设置或与融冰母线装置侧隔离开关一体设置。

图 E.3 融冰母线装置侧采用四台隔离开关与融冰母线的连接型式



标引序号说明：

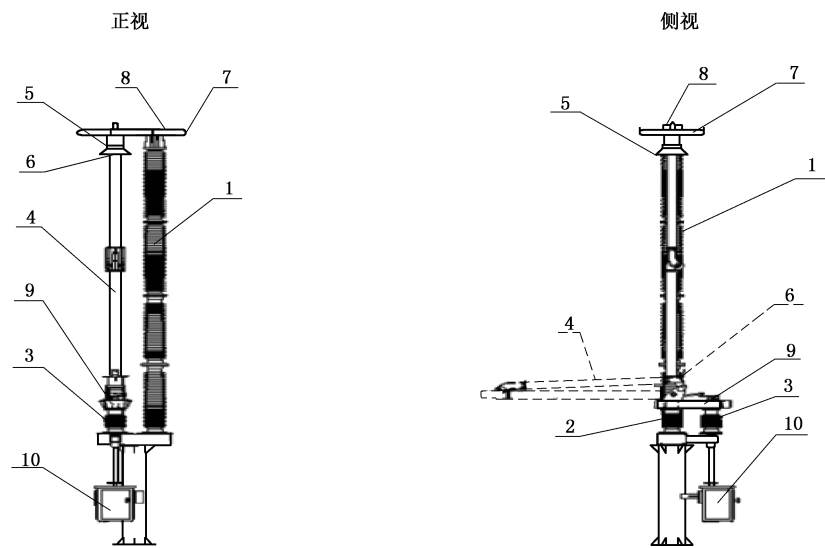
- 1——融冰母线装置侧隔离开关；
- 2——极母线接地开关；
- 3——支柱绝缘子；
- 4——融冰母线；
- 5——融冰母线侧连接导体；
- 6——直流融冰装置侧连接导体。

注：直流极母线接地开关用于直流融冰装置检修接地,根据需要单独设置或与融冰母线装置侧隔离开关一体设置。

图 E.4 融冰母线装置侧采用六台隔离开关与融冰母线的连接型式

E.1.2 融冰母线线路侧隔离开关及其连接

融冰母线线路侧隔离开关通常采用图 E.5 和图 E.6 两种型式。



标引序号说明：

- 1 —— 高压支柱绝缘子；
- 2 —— 低压支柱绝缘子；
- 3 —— 操作支柱绝缘子；
- 4 —— 垂直伸缩式导电回路；
- 5 —— 静触头；
- 6 —— 动触头；
- 7 —— 均压环；
- 8 —— 高压接线端子板；
- 9 —— 低压接线端子板；
- 10 —— 电动操作机构。

图 E.5 单柱单臂垂直伸缩式隔离开关

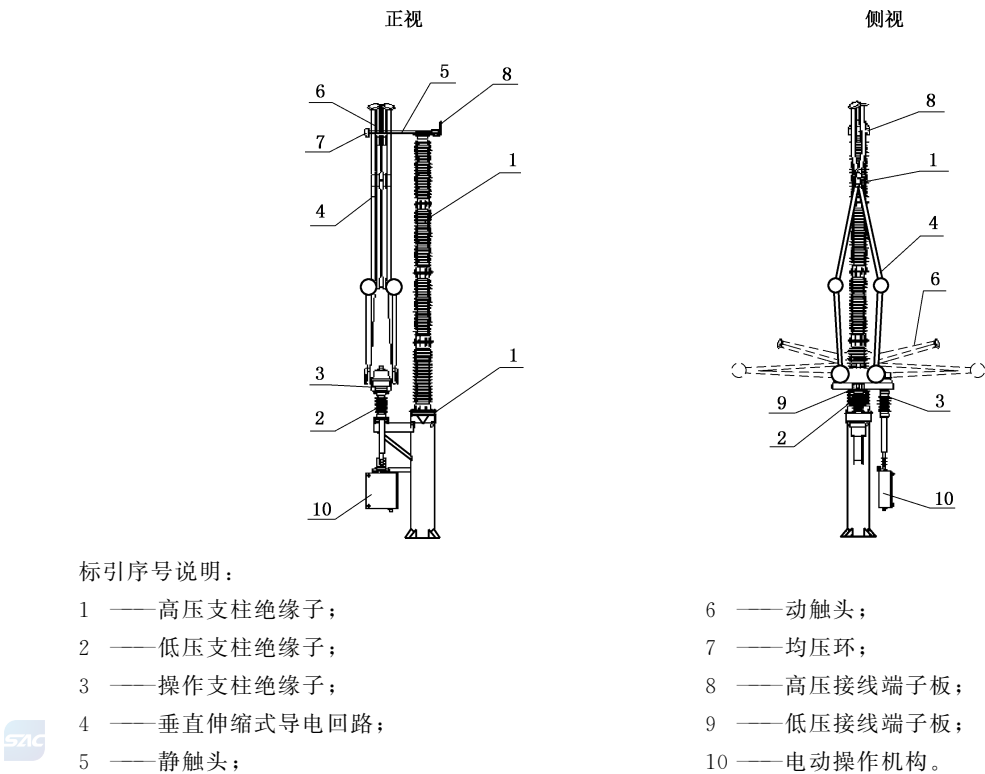


图 E.6 单柱双臂垂直伸缩式隔离开关

线路侧隔离开关与融冰母线的连接见图 E.7。

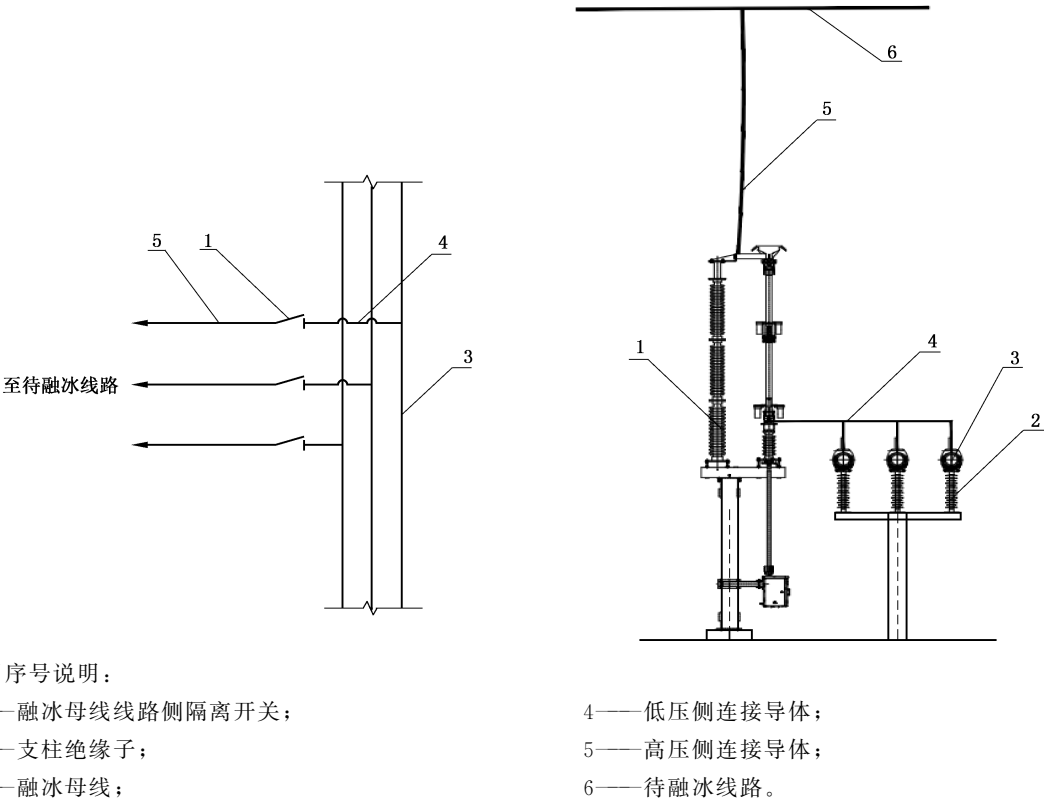
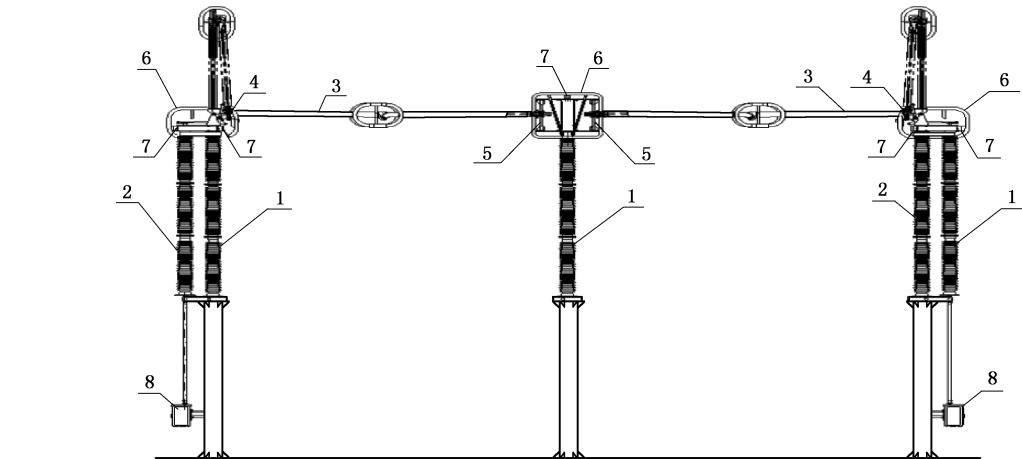


图 E.7 融冰母线线路侧隔离开关与融冰母线连接

E.1.3 导线短接隔离开关

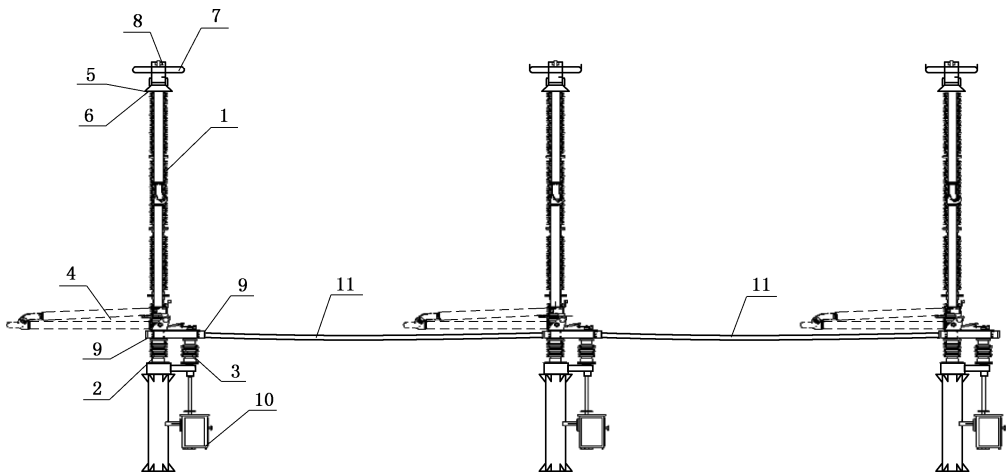
导线短接隔离开关通常采用图 E.8、图 E.9 和图 E.10 三种型式,均能实现两相导线短接和三相导线短接。图 E.8 采用共静触头隔离开关短接,图 E.9 采用三台单柱单臂垂直伸缩式隔离开关短接,图 E.10 采用三台单柱双臂垂直伸缩式隔离开关短接。



标引序号说明:

- | | |
|---------------|------------|
| 1——高压支柱绝缘子; | 5——静触头; |
| 2——操作支柱绝缘子; | 6——均压环; |
| 3——水平伸缩式导电回路; | 7——接线端子板; |
| 4——动触头; | 8——电动操作机构。 |

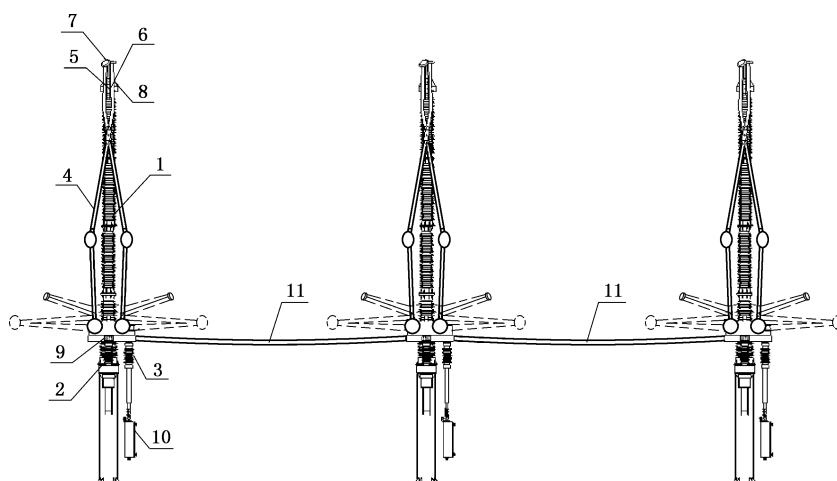
图 E.8 共静触头隔离开关短接



标引序号说明:

- | | |
|-----------------|---------------|
| 1 —— 高压支柱绝缘子; | 7 —— 均压环; |
| 2 —— 低压支柱绝缘子; | 8 —— 高压接线端子板; |
| 3 —— 操作支柱绝缘子; | 9 —— 低压接线端子板; |
| 4 —— 垂直伸缩式导电回路; | 10 —— 电动操作机构; |
| 5 —— 静触头; | 11 —— 相间短接导体。 |
| 6 —— 动触头; | |

图 E.9 三台单柱单臂垂直伸缩式隔离开关短接



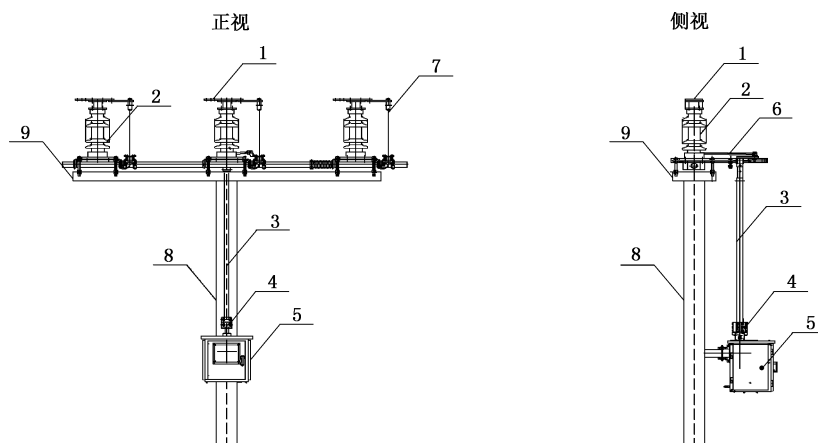
标引序号说明：

- | | |
|-----------------|---------------|
| 1 —— 高压支柱绝缘子； | 7 —— 均压环； |
| 2 —— 低压支柱绝缘子； | 8 —— 高压接线端子板； |
| 3 —— 操作支柱绝缘子； | 9 —— 低压接线端子板； |
| 4 —— 垂直伸缩式导电回路； | 10 —— 电动操作机构； |
| 5 —— 静触头； | 11 —— 相间短接导体。 |
| 6 —— 动触头； | |

图 E.10 采用三台单柱双臂垂直伸缩式隔离开关

E.1.4 融冰母线接地开关及其连接

融冰母线接地开关通常采用图 E.11 的型式。



标引序号说明：

- | | |
|--------------|------------|
| 1 —— 接线端子板； | 6 —— 动触头； |
| 2 —— 支柱绝缘子； | 7 —— 静触头； |
| 3 —— 垂直连杆； | 8 —— 安装立柱； |
| 4 —— 夹板； | 9 —— 固定支架。 |
| 5 —— 电动操作机构； | |

图 E.11 融冰母线接地开关

融冰母线接地开关与融冰母线的连接见图 E.12。

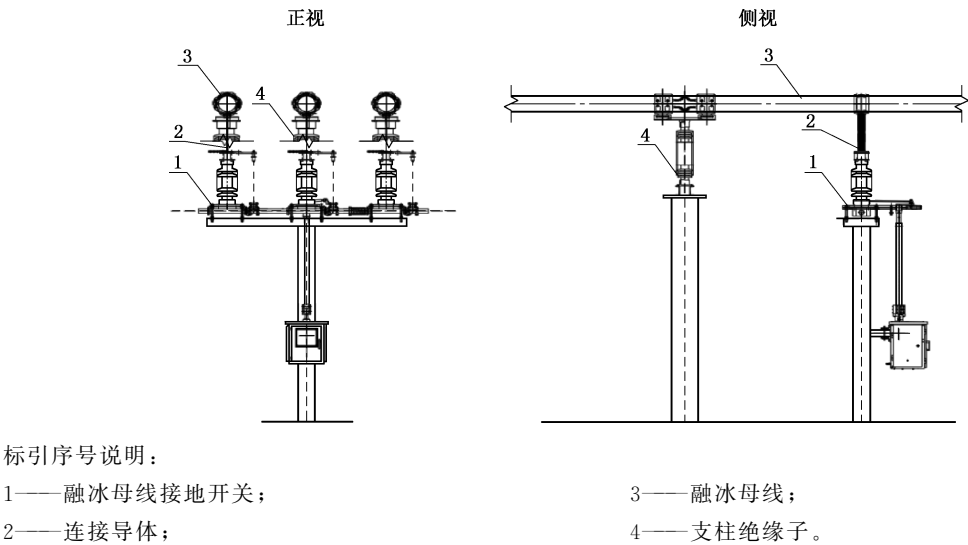
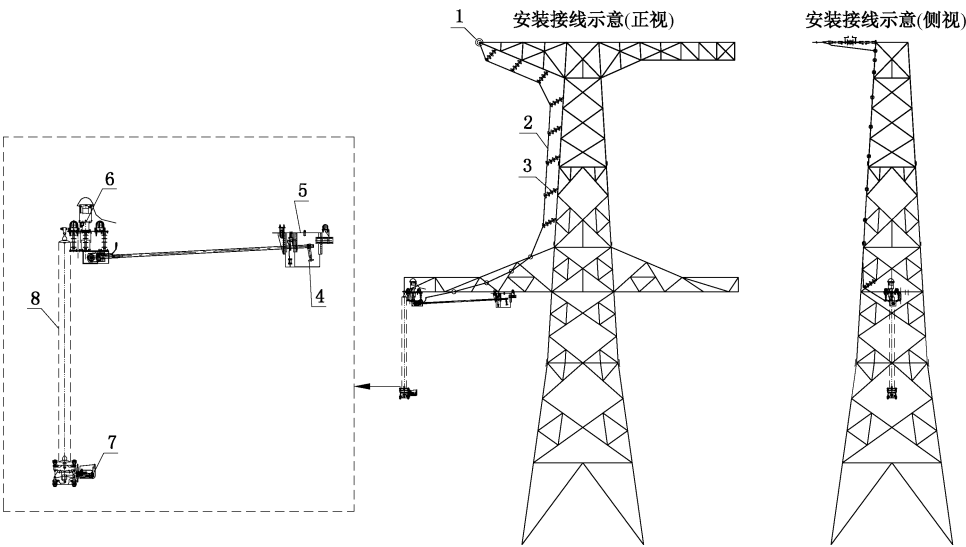


图 E.12 融冰母线接地开关与融冰母线的连接

E.2 站外融冰隔离开关和接地开关及其连接

E.2.1 导线和地线联络隔离开关

导线和地线联络隔离开关及其连接通常采用图 E.13 的型式。



- 标引序号说明：
- 1——地线绝缘耐张串；
2——地线引下线；
3——地线绝缘引下线夹；
4——动触头；
5——保护罩；
6——传动机构；
7——静触头；
8——导线跳线绝缘子串。

图 E.13 导线和地线联络隔离开关

E.2.2 地线和引接线联络隔离开关

地线和引接线联络隔离开关及其连接通常采用图 E.14 的型式。

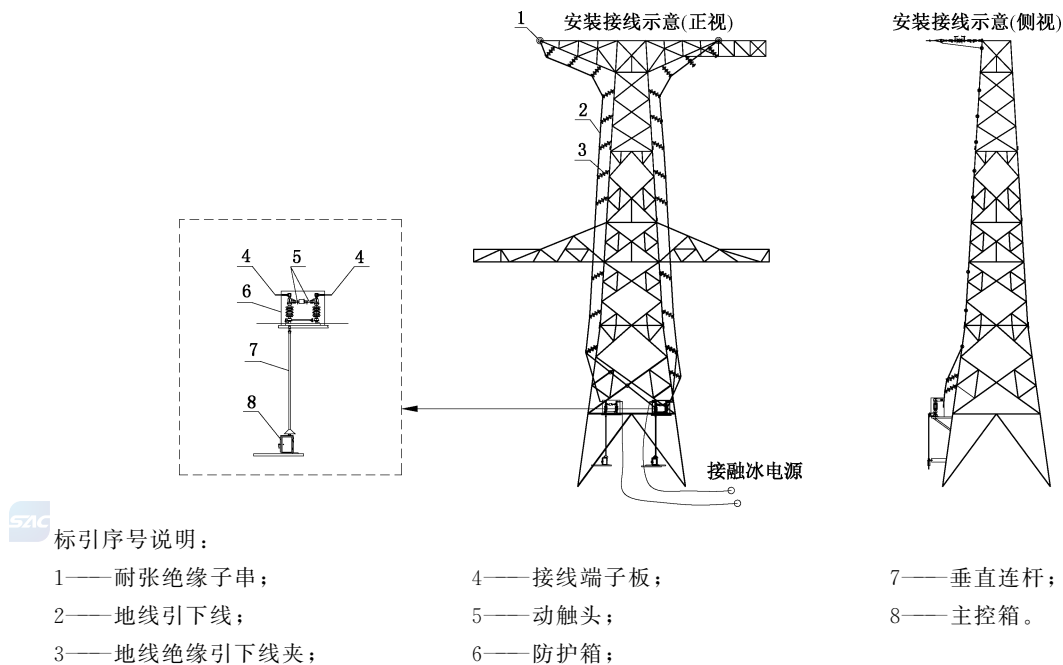


图 E.14 地线和引接线联络隔离开关

E.2.3 地线短接隔离开关及其连接

地线短接隔离开关见图 E.15。

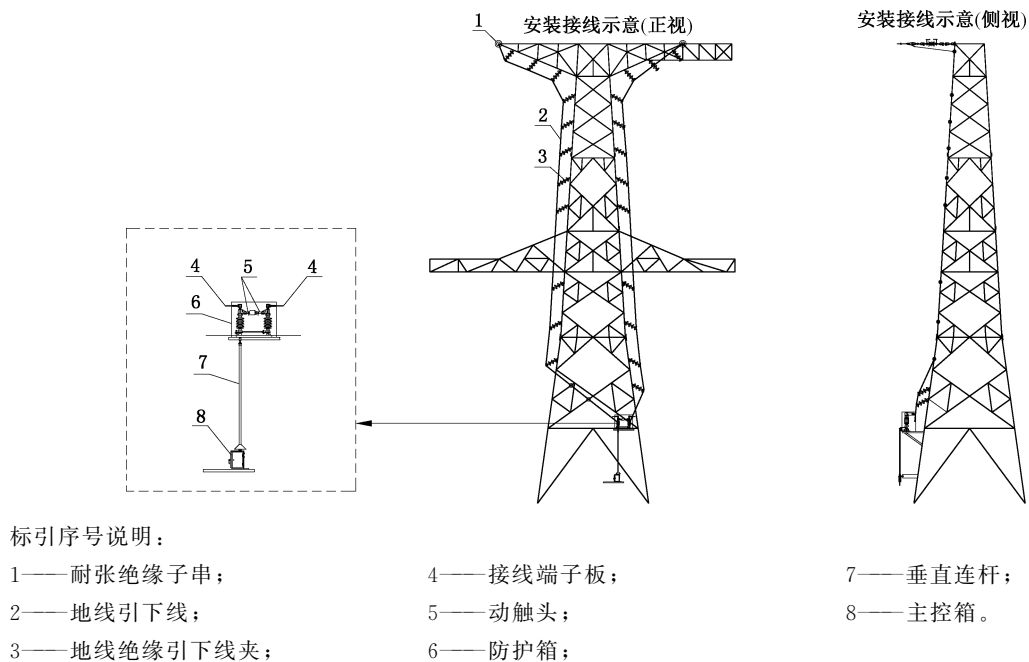
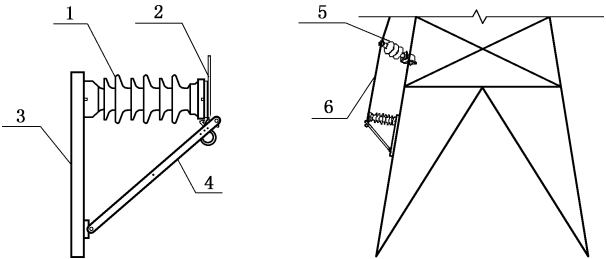


图 E.15 地线短接隔离开关

E.2.4 地线接地开关及其连接

架空地线和光纤复合地线(OPGW)绝缘化后设置的接地开关及其连接见图 E.16。



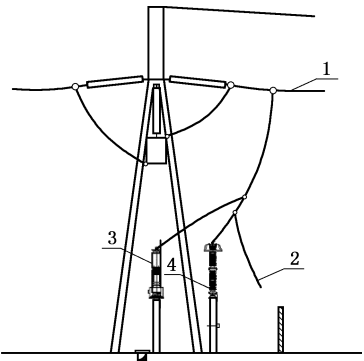
标引序号说明：

- 1——支柱绝缘子；
- 2——静触头；
- 3——安装底座；
- 4——动触头；
- 5——支柱绝缘子；
- 6——地线引下线。

图 E.16 地线接地开关及其连接

E.3 直流融冰装置与融冰线路的临时接线

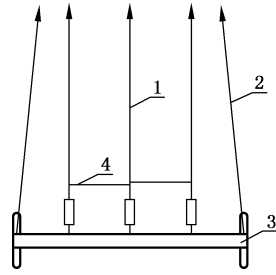
直流融冰装置与融冰线路采用临时接线接入时，直流融冰装置侧与三相导线临时接线见图 E.17，线路三相导线短接临时接线见图 E.18。



标引序号说明：

- 1——待融冰线路；
- 2——融冰用临时导线；
- 3——电压互感器；
- 4——金属氧化物避雷器。

图 E.17 直流融冰装置侧临时接线



标引序号说明：

1——待融冰线路；

2——地线；

3——构架；

4——短接用临时连接线。

注：短接用临时连接线根据现场情况设置于线路导线或站内引下线上。

图 E.18 线路三相导线短接临时接线

附录 F
(资料性)

直流融冰装置设计方法及主回路典型参数

F.1 电网换相直流融冰装置设计

F.1.1 电网换相直流融冰装置设计流程

电网换相直流融冰装置采用图 F.1 的流程进行系统设计。

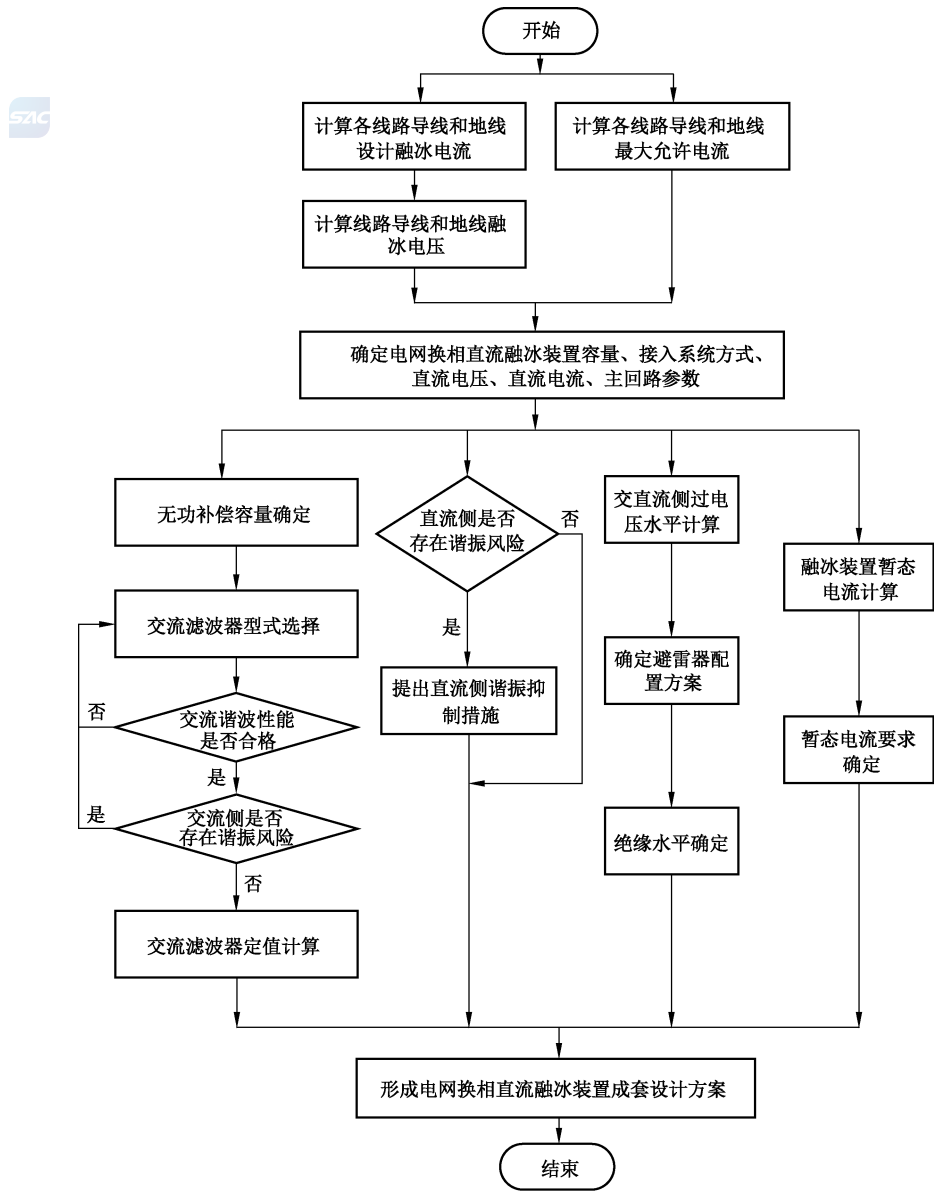


图 F.1 电网换相直流融冰装置设计流程

F.1.2 电网换相直流融冰装置主回路参数设计方法及示例

F.1.2.1 电网换相直流融冰装置主回路参数设计流程

电网换相直流融冰装置主回路参数设计流程如图 F.2 所示。

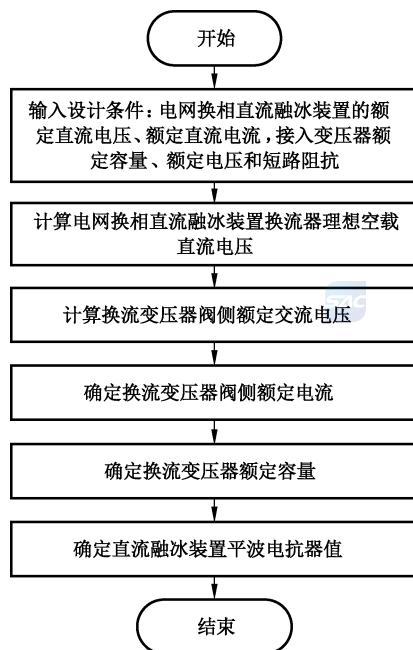


图 F.2 电网换相直流融冰装置主回路参数设计流程

F.1.2.2 电网换相直流融冰装置主回路参数设计示例

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, 采用图 C.1 所示主接线, 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%。按照如下步骤进行设计:

a) 电网换相换流器理想空载直流电压

电网换相换流器在额定触发角下的理想空载直流电压由公式(F.1)计算, 即:

$$U_{di0N} = \frac{\frac{U_{dN}}{n} + V_T}{\cos\alpha_N - d_{xn} - d_{rn}} \dots\dots\dots (F.1)$$

式中:

U_{di0N} ——电网换相换流器额定触发角下理想空载直流电压, 单位为千伏(kV);

U_{dN} ——直流融冰装置额定直流电压, 单位为千伏(kV);

α_N ——额定触发角(额定直流电压和直流功率工况时对应的触发角), 单位为电角度(°)。一般取 5°~20°;

n ——6 脉动换流器个数。6 脉动电网换相换流器取 1, 双桥串联形成的 12 脉动电网换相换流器取 2;

d_{xn} ——直流感性压降标幺值。 $d_{xn} \approx U_K/2$, $U_K(\%)$ 为系统阻抗电压 $U_s(\%)$ 与换流变压器阻抗电压 $U_T(\%)$ 之和, 设计中一般忽略系统阻抗电压, 只考虑换流变压器阻抗电压;

d_{rn} ——直流阻性压降标幺值, 可取零;

V_T ——换流器正向导通压降,单位为千伏(kV),可取零。

本示例中,直流融冰装置额定直流电压 U_{dN} 为 50 kV,额定触发角 α_N 取 15° ,6 脉动换流器个数 n 为 2,忽略系统阻抗电压、直流阻性压降、换流器正向导通压降后, $d_{xn} = V_T/2 = 0.06$,计算得到直流融冰装置理想空载直流电压 U_{d0N} 为 27.61 kV。

b) 换流变压器阀侧额定电压

直流融冰装置换流变压器采用一台三相三绕组变压器(Dyd 或 Ddy),换流变压器阀侧额定电压由公式(F.2)计算:

$$U_{VN} = U_{d0N} / 1.35 \quad \dots\dots\dots (F.2)$$

式中:

U_{VN} ——换流变压器阀侧额定电压,单位为千伏(kV)。

本示例中计算得到直流融冰装置换流变压器阀侧额定电压 U_{VN} [即换流变压器两个二次绕组(y、d)额定电压]均为 20.45 kV,取 20.5 kV。

c) 换流变压器阀侧额定电流

换流变压器阀侧额定电流由公式(F.3)计算,即

$$I_{VN} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times I_{dN} \times (1 + k_h) = 0.816 I_{dN} \times (1 + k_h) \quad \dots\dots\dots (F.3)$$

式中:

I_{VN} ——换流器额定阀侧电流,单位为千安(kA);

I_{dN} ——换流器直流电流,单位为千安(kA);

k_h ——谐波功率倍数,一般取 0.05~0.15。

本示例中谐波功率倍数 K 取 0.1,计算得到直流融冰装置换流变压器两个二次绕组(y、d)额定电流(线电流) I_{VN} 为 4.5 kA。

d) 换流变压器额定容量

换流变压器额定容量由公式(F.4)计算,即

$$S_N = \sqrt{3} \times U_{VN} \cdot I_{VN} \quad \dots\dots\dots (F.4)$$

式中:

S_N ——换流变压器额定容量,单位为兆伏安(MVA)。

本示例中,计算得到直流融冰装置的三相三绕组变压器(D/y/d)额定容量 S_N 为 320 MVA,二次侧额定容量为 160 MVA。

e) 换流变压器网侧额定电流

根据换流变压器额定容量、网侧额定电压和阀侧额定电压,网侧额定电流和阀侧额定电流分别由公式(F.5)和公式(F.6)计算。

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \times U_{1N}} \quad \dots\dots\dots (F.5)$$

$$I_{2N} = I_{VN} \quad \dots\dots\dots (F.6)$$

式中:

I_{1N} ——换流变压器网侧额定电流,单位为千安(kA);

I_{2N} ——换流变压器阀侧额定电流,单位为千安(kA);

U_{1N} ——换流变压器网侧额定电压,单位为千伏(kV)。

本示例中,计算得到换流变压器网侧额定电流 I_{1N} 为 2.8 kA,阀侧额定电流 I_{2N} 为 4.5 kA。

f) 额定直流电压对应触发角

额定直流电压对应的触发角由公式(F.7)计算：

$$\alpha_N = \cos^{-1} \left(\frac{U_{dN}/n}{U_{di0N}} + d_{xn} + d_{rn} \right) \dots\dots\dots (F.7)$$

本示例中,计算得到额定直流电压 50 kV 对应的触发角 α_N 为 15.6° 。

g) 换流变压器感抗

换流变压器感抗由公式(F.8)计算：

$$X_T = \frac{U_{2N}^2}{S_N} \times U_T \dots\dots\dots (F.8)$$

式中：

X_T ——换流变压器阻抗,单位为欧姆(Ω)；

U_T ——换流变压器阻抗电压,一般取 $0.08 \sim 0.12$ 。

本示例中,换流变压器阻抗电压 U_T 为 0.12 ,计算得到直流融冰装置换流变压器感抗 X_T 为 0.32Ω 。

h) 零功率模式下最小允许电流回路需要电感值

对于 12 脉动电网换流器直流融冰装置,零功率模式下最小允许电流回路需要的电感由公式(F.9)计算：

$$L_{dcs} = K_{sr} \times \frac{0.031 U_{2N}}{\omega \cdot I_{almin}} \dots\dots\dots (F.9)$$

式中：

I_{almin} ——直流融冰回路最小允许电流,单位为千安(kA),一般取 0.1 kA ；

ω ——工频角频率,单位为弧度每秒(rad/s)；

K_{sr} ——保证零功率试验时电流不断续的可靠因数,一般取 $2.0 \sim 2.5$ 。

本示例中,直流融冰回路最小允许电流 I_{almin} 取 0.1 kA ,可靠因数 K_{sr} 取 2.1 ,得到直流融冰装置零功率模式下最小允许电流需要的电感 L_{dcs} 为 42.5 mH 。

i) 平波电抗器电感值

平波电抗器电感值由公式(F.10)计算：

$$L_{SR} = L_{dcs} - 3.5 X_T / (2\omega) \dots\dots\dots (F.10)$$

本示例中,计算得到直流融冰装置平波电抗器电感 L_{SR} 为 38.9 mH ,取 40 mH ,分为两台($20 \text{ mH} + 20 \text{ mH}$),分别布置在直流融冰装置直流侧正负极出口与站内融冰管母线之间。

j) 直流主回路设计参数汇总

按照上述电网换相直流融冰装置主回路参数设计方法计算出的某工程用额定容量 250 MW 、额定直流电压 50 kV 电网换相直流融冰装置主回路参数设计值如表 F.1 所示。

表 F.1 某工程电网换相直流融冰装置主回路参数设计值汇总

设备	参数	值	备注
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 I_{dmin}/kA	0.1	—
	触发角运行范围 $\alpha/\text{电角度}^\circ$	$5 \sim 90$	—

表 F.1 某工程电网换相直流融冰装置主回路参数设计值汇总（续）

设备	参数	值	备注
换流变压器	网侧额定电压 U_{1N}/kV	66	—
	阻抗电压/%	12	—
	阀侧额定电压 U_{2N}/kV	20.5	—
	网侧额定电流 I_{1N}/kA	2.8	—
	阀侧额定电流 I_{1N}/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/mH	20+20	两台,正负极各一台

F.1.3 电网换相直流融冰装置绝缘配合设计方法及示例

F.1.3.1 电网换相直流融冰装置绝缘配合设计流程

电网换相直流融冰装置绝缘配合设计流程如图 F.3 所示。

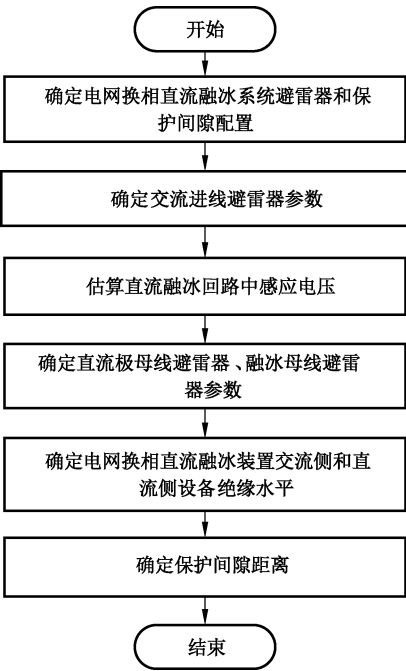


图 F.3 电网换相直流融冰装置绝缘配合设计流程

F.1.3.2 电网换相直流融冰装置绝缘配合示例

仍为 F.1.2 中的某工程电网换相直流融冰装置。避雷器配置方案如图 C.1 所示,按照如下步骤进行绝缘配合设计。

a) 交流进线避雷器参数选择

交流进线避雷器选取 66 kV 电压等级避雷器,根据 GB/T 11032—2020 的附录 D,选取避雷器

额定电压 102 kV,操作冲击保护水平为 226 kV,雷电冲击保护水平 266 kV。

b) 直流极母线避雷器、融冰母线避雷器参数选择

直流极母线避雷器、融冰母线避雷器最大持续运行电压考虑直流极母线运行电压及融冰回路中的电磁感应电压。

其中,直流融冰装置直流极母线避雷器的持续运行电压最大峰值(PCOV)即为直流极母线运行电压,同时考虑直流电压测量装置的测量误差,此处按照准确度 0.2 级的电压测量装置考虑。

融冰回路中感应电压中的容性感应主要由导线和地线对地电容分压产生,在接入直流融冰装置前已经进行抑制。感性感应电压由交流电流电磁耦合产生。融冰回路中的电磁感应电压都可通过公式估算和电磁暂态数字仿真计算得到。电磁感应电压施加在直流融冰装置阀组端间,解锁前都小于直流融冰装置阀组额定电压,解锁后阀组电磁感应电压很小,阀组间增加量不超过 2 kV。

考虑电磁感应电压后的避雷器持续运行电压由公式(F.11)计算:

$$U_{ccov} = 1.002 \times U_{dN} + U_{ac} \dots\dots\dots (F.11)$$

式中:

U_{ac} ——融冰回路中电磁感应电压,单位为千伏(kV),不超过 2 kV。

本示例中, U_{ac} 取 2 kV,计算得到避雷器持续运行电压为 52.10kV。

根据母线避雷器的特性,荷电率通常按照 0.8 考虑,避雷器额定电压最小值由公式(F.12)计算:

$$U_{refmin} = \frac{U_{ccov}}{\sqrt{2} \times K} \dots\dots\dots (F.12)$$

得到避雷器额定电压最小值为 46.06 kV。

根据 GB/T 11032—2020 的附录 D,这里按照交流电压等级 35 kV 选取,额定电压为 51 kV 的避雷器,操作冲击保护水平为 114 kV,雷电冲击保护水平为 134 kV。

c) 绝缘水平的确定

由于直流融冰装置交流侧、直流侧避雷器分别按照 66 kV、35 kV 标准交流电压等级避雷器选取,因此直流融冰装置交流侧、直流侧设备绝缘水平按照 GB/T 311.1 规定的标准绝缘水平选取。见表 F.2。

表 F.2 某工程电网换相直流融冰装置交流侧、直流侧设备绝缘水平

设备	额定雷电冲击耐受电压 (峰值) kV	额定短时工频耐受电压 (方均根值) kV
换流变压器网侧设备	325	140
换流变压器阀侧及直流侧设备	200	95

换流变压器阀侧未配置避雷器直接保护,交流侧操作冲击传递到换流变压器阀侧的过电压按照换流变压器网侧交流侧操作冲击过电压达到交流进线避雷器操作冲击保护水平考虑。换流变压器阀侧过电压水平由公式(F.13)计算:

$$U_V = U_{SIPL} / K_t \dots\dots\dots (F.13)$$

式中:

K_t ——换流变压器额定变比,此处取 66/20.5。

得到换流变压器的阀侧过电压水平为 70.19 kV。

换流变压器阀侧设备操作冲击耐受水平按雷电耐受水平的 0.83 倍估算得到：

$$U_{\text{SIWL}}=0.83\times 200=166\text{ kV}$$

换流变压器阀侧设备操作冲击绝缘裕度为 $(166/70.19-1)\times 100\%=136\%$ ，满足 GB/T 311.3 要求的绝缘裕度。

d) 保护用空气间隙距离计算

根据 6.2.5.10，空气间隙操作冲击 50%放电电压选取为 90%的避雷器操作冲击保护水平：

$$U_{50\text{S}}=90\%\times 114=102.6\text{ kV}$$

雷电冲击 50%放电电压选取为 90%的避雷器雷电冲击保护水平：

$$U_{50\text{L}}=90\%\times 134=120.6\text{ kV}$$

根据 GB/T 311.2 对保护间隙距离近似计算（取棒-棒间隙因数 1.35）：

操作冲击间隙计算如下：

$$d_{\text{S}}=\frac{\frac{102.6}{e^{\frac{1.35\times 1.080}{0.46}}}-1}{0.46}=158\text{ mm}$$

雷电冲击间隙计算如下：



$$d_{\text{L}}=\frac{120.6}{700}=172\text{ mm}$$

考虑间隙在操作过电压和雷电过电压下均起到保护作用，间隙值取为操作冲击间隙计算值和雷电冲击间隙计算值中的较小值，即 158 mm。

F.1.4 电网换相直流融冰装置设备耐受电流设计方法及示例

F.1.4.1 电网换相直流融冰装置设备耐受电流设计流程

电网换相直流融冰装置设备耐受电流设计流程如图 F.4 所示。

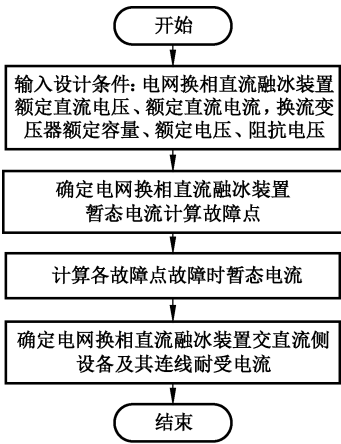


图 F.4 电网换相直流融冰装置设备耐受电流设计流程

F.1.4.2 电网换相直流融冰装置设备耐受电流设计示例

仍为 F.1.2 中的某工程电网换相直流融冰装置。直流侧不接地，暂态电流计算故障点如图 F.5 所示，按照如下步骤进行设备耐受电流设计。

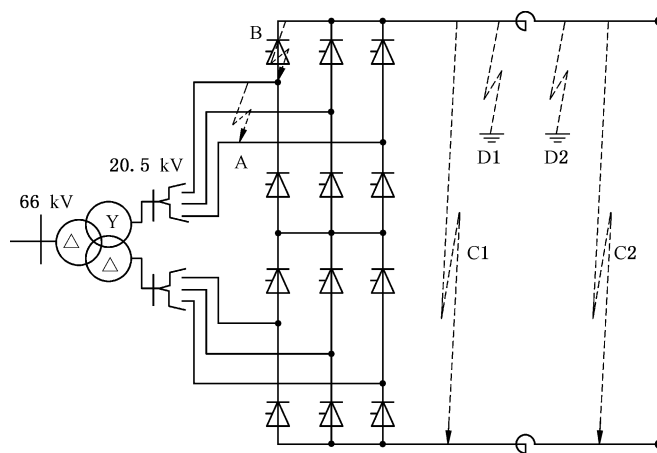


图 F.5 电网换相直流融冰装置故障点

a) 换流变压器与阀之间的三相短路(故障 A)故障电流计算

对换流变压器和阀之间的连接母线,发生在换流变压器阀侧内的三相短路故障 A 时产生的短路电流最大。参考 GB/T 1094.5,当 X/R 为 14 时,因数取 2.55,即三相短路峰值电流 I_{crest} 等于稳态短路电流的 2.55 倍,由公式(F.14)计算:

$$I_{\text{crest}} = \frac{U_{\text{ve}} / \sqrt{3}}{X_{\text{SC}}} \times 2.55 \quad \dots\dots\dots (\text{F.14})$$

式中:

U_{ve} ——换流器交流侧线电压,考虑可能的最大值,单位为千伏(kV)。

X_{SC} ——折算到换流器交流侧的每相阻抗,包括电网等效阻抗、上一级降压变压器的短路阻抗。考虑苛刻边界,忽略电网等效阻抗,单位为欧姆(Ω)。

本示例中,500 kV/66 kV 降压阻抗折算到直流融冰装置换流变压器二次侧为:

$$X_{\text{T1}} = \frac{U_{\text{norm}}^2}{S_{\text{norm}}} \times U_{\text{k}} \times \frac{U_{\text{sec}}^2}{U_{\text{pri}}^2} = \frac{66^2}{320} \times 12\% \times \frac{20.5^2}{66^2} = 0.1576 \Omega$$

换流变压器为一台三相三绕组双分裂换流变压器变压器,阻抗为:

$$X_{\text{T2}} = \frac{U_{\text{norm}}^2}{S_{\text{norm}}} \times U_{\text{k}} = \frac{20.5^2}{66^2} \times 12\% = 0.3152 \Omega$$

换流变压器漏抗具有制造误差,考虑 5% 裕度:

$$X_{\text{SC}} = 95\% \times (X_{\text{T1}} + X_{\text{T2}}) = 0.4491 \Omega$$

U_{ve} 根据网侧电压 550 kV 折算,计算得到三相短路峰值电流 I_{crestA} :

$$I_{\text{crestA}} = \frac{\frac{20.5 \times 550}{525 \times \sqrt{3}}}{0.4491} \times 2.55 = 70.4 \text{ kA}$$

b) 阀桥臂短路(故障 B)故障电流计算

对阀以及有关的内部连接母线来说,故障 B 产生最大短路电流,其等效故障电路如图 F.6 所示,阀短路电流峰值由公式(F.15)近似估算:

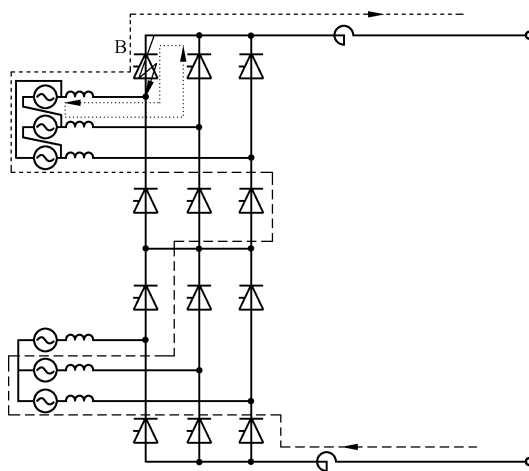


图 F.6 晶闸管阀短路故障

$$I_{\text{crestB}} = I_{\text{dN}} / d_{\text{xe}} \quad \dots\dots\dots (\text{F.15})$$

式中：

$$d_{\text{xe}} = \frac{X_{\text{sc}}}{\frac{\pi}{3} \times \frac{U_{\text{di0}}}{I_{\text{dN}}}} = \frac{0.449 \text{ } \Omega}{\frac{\pi}{3} \times \frac{1.35 \times 20.5}{5}} = 0.077 \text{ } \Omega$$

因此有

$$I_{\text{crestB}} = \frac{I_{\text{dN}}}{d_{\text{xemin}}} = \frac{5}{0.142 \text{ } \Omega} = 64.53 \text{ kA}$$

- c) 换流器与平波电抗器之间的极间短路(故障 C1)故障电流计算

考虑保护不动作的极端情况,该故障下流经穿墙套管的持续电流理论最大值为：

$$I_{\text{dmax}} = \frac{U_{\text{ve}} / \sqrt{3}}{X_{\text{sc}}} \times \sqrt{2} = \frac{20.5 \times 550}{0.449 \text{ } \Omega} \times \sqrt{2} = 39.04 \text{ kA}$$

换流器直流极母线电流峰值和故障点电流峰值均小于 A 故障电流峰值。

- d) 平波电抗器线路侧的极间短路(故障 C2)故障电流计算

考虑保护不动作的极端情况,该故障下流经穿墙套管的持续电流最大值小于 C1 故障电流峰值。

- e) 换流器与平波电抗器之间的极对地短路(故障 D1)故障电流计算

直流侧单点接地,无故障电流。

- f) 平波电抗器直流线路侧对地短路(故障 D2)故障电流计算

直流侧单点接地,无故障电流。

- g) 设备耐受电流确定

根据以上计算结果,某工程用电网换相直流融冰装置设备耐受电流设计要求值如表 F.3 所示。

表 F.3 某工程电网换相直流融冰装置设备耐受电流设计要求值

设备	计算值(峰值) kA	短时耐受电流设计要求值 kA	峰值耐受电流设计要求值 kA
换流变压器阀侧交流母线	70.40	31.50	80.00
晶闸管阀及相关连线	64.53	承受浪涌电流能力不低于 65.00	
平波电抗器	39.04	40.00	
晶闸管阀及平波电抗器连线	64.53 热稳定 39.04	40.00	100.00

F.2 模块化多电平直流融冰装置设计



F.2.1 模块化多电平直流融冰装置设计流程

模块化多电平直流融冰装置采用图 F.7 的流程进行系统设计。

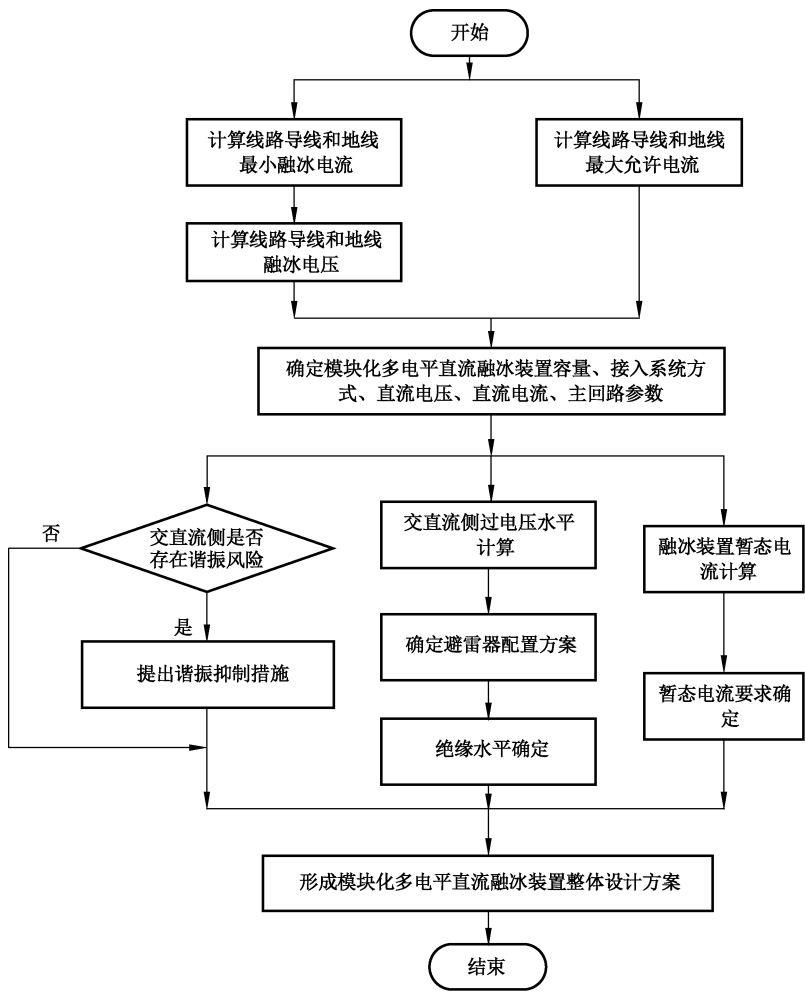


图 F.7 模块化多电平直流融冰装置设计流程图

F.2.2 模块化多电平直流融冰装置主回路参数设计方法及示例

F.2.2.1 模块化多电平直流融冰装置主回路参数设计流程

模块化多电平直流融冰装置主回路参数设计流程如图 F.8 所示。

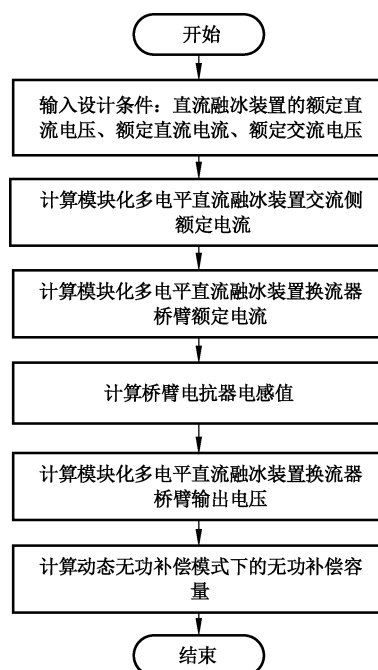


图 F.8 模块化多电平直流融冰装置主回路参数设计流程

F.2.2.2 模块化多电平直流融冰装置主回路参数设计示例

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 C.2 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%。按照如下步骤进行设计。

a) 模块化多电平直流融冰装置阀侧额定电流计算

模块化多电平直流融冰装置阀侧额定电流由公式(F.16)计算：

$$I_{VN} = \frac{U_{dN} \cdot I_{dN}}{\sqrt{3} \times U_{VN}} \quad \dots\dots\dots (F.16)$$

式中：

U_{dN} —— 模块化多电平直流融冰装置的额定直流电压, 单位为千伏(kV)；

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)；

U_{VN} —— 模块化多电平直流融冰装置阀侧交流母线额定电压, 单位为千伏(kV)；

I_{VN} —— 模块化多电平直流融冰装置阀侧额定电流, 单位为千安(kA)。

计算得到模块化多电平直流融冰装置阀侧额定电流 I_{VN} 为 1.32 kA。

b) 模块化多电平直流融冰装置换流器桥臂额定电流计算

模块化多电平直流融冰装置的桥臂额定电流由公式(F.17)计算：

$$I_{\text{armN}} = \sqrt{\frac{I_{\text{dN}}^2}{9} + \frac{I_{\text{VN}}^2}{4}} \dots\dots\dots (\text{F.17})$$

式中:

I_{armN} ——模块化多电平直流融冰装置换流器桥臂额定电流,单位为千安(kA)。

计算得到模块化多电平直流融冰装置桥臂额定电流 I_{VN} 为 1.488 kA。

功率器件选型时电流裕度因数一般不小于 1.3,本算例模块化多电平直流融冰装置输出电流 2 h 过载要求为 1.1 倍,因此功率器件额定电流不小于 $1.3 \times 1.1 \times 1.488 = 2.127$ kA。

c) 桥臂电抗器电感值设计

考虑滤波需求,桥臂电抗器电感值按公式(F.18)设计:

$$L_{\text{arm}} \geq \max \left(K \cdot \frac{2U_{\text{VN}}^2}{\omega \cdot U_{\text{dN}} \cdot I_{\text{dN}}}, \frac{U_{\text{dN}}}{2d_{\text{IT}}} \right) \dots\dots\dots (\text{F.18})$$

式中:

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%;

d_{IT} ——桥臂电流上升率,单位为安培每毫秒(A/ms)。桥臂电流上升率不大于 2 倍功率器件额定电流每毫秒,本算例中为 $2.127 \times 2 = 4.255$ kA/ms。

计算得桥臂电抗器值为 7.8 mH。

d) 模块化多电平直流融冰装置的桥臂输出电压计算

模块化多电平直流融冰装置的桥臂输出额定电压由公式(F.19)计算。

$$U_{\text{armN}} = \frac{U_{\text{dN}}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times \left(k_{\text{V}} \times U_{\text{V}} + \frac{Q_{\text{deicingN}} \cdot X}{2U_{\text{Vmax}}} \right) \dots\dots\dots (\text{F.19})$$

式中:

k_{V} ——电网电压波动因数,一般取 1.1~1.2;

U_{V} ——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融冰模式下额定融冰功率时动态无功功率额定容量,单位为兆乏(MVar),一般设计为零;

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)。

模块化多电平直流融冰装置融冰模式下额定无功功率设计值 Q_{deicingN} 取零,电网电压波动因数 k_{V} 取 1.2,计算得到桥臂输出电压为 44.29 kV。

e) 静止同步补偿模式下动态无功补偿额定容量的确定

静止同步补偿模式下动态无功补偿额定容量由公式(F.20)计算:

$$Q = 2\sqrt{3}U_{\text{VN}} \cdot I_{\text{armN}} \dots\dots\dots (\text{F.20})$$

计算得到静止同步补偿模式下无功补偿容量 Q 为 180 Mvar。

f) 模块化多电平直流融冰装置直流主回路参数的确定

按照以上模块化多电平直流融冰装置主回路参数设计方法,计算出的模块化多电平直流融冰装置主回路参数设计值如表 F.4 所示。

表 F.4 某工程模块化多电平直流融冰装置参数汇总

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_{dN}/kV	20
	额定直流电流 I_{dN}/kA	4
	最小运行电流 I_{dmin}/kA	0.05
	额定交流电压 U_{1N}/kV	35
	额定交流电流 I_{VN}/kA	1.32
	桥臂额定电流 I_{armN}/kA	1.49
	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 $Q_{deicingN}/\text{Mvar}$	0
	静止同步补偿模式下无功补偿容量 Q/Mvar	180

F.2.3 模块化多电平直流融冰装置绝缘配合设计方法及示例

F.2.3.1 模块化多电平直流融冰装置绝缘配合设计流程

模块化多电平直流融冰装置绝缘配合设计流程如图 F.9 所示。

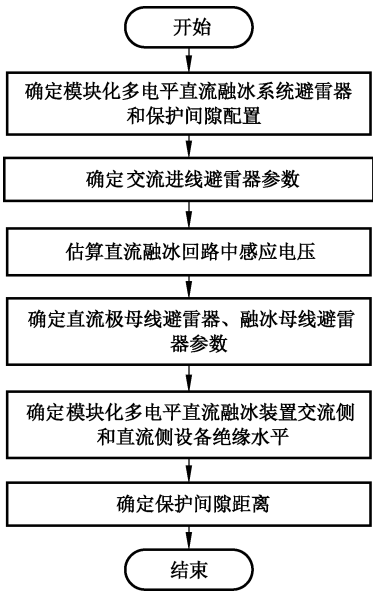


图 F.9 模块化多电平直流融冰装置绝缘配合设计流程

F.2.3.2 模块化多电平直流融冰装置绝缘配合设计示例

为 F.2.2 中的某工程模块化多电平直流融冰装置,避雷器配置方案如图 C.3 所示,按照如下步骤进行绝缘配合设计。

a) 交流进线避雷器参数设计

交流进线避雷器选取 35 kV 电压等级避雷器,根据 GB/T 11032—2020 的附录 D,选取避雷器

额定电压 51 kV,操作冲击保护水平为 114 kV,雷电冲击保护水平 134 kV。

b) 直流极母线、融冰母线避雷器参数设计

直流极母线、融冰母线避雷器最大持续运行电压考虑直流极母线运行电压及并行交流线路的感应电压。

模块化多电平直流融冰装置直流极母线避雷器的 PCOV 即为直流极母线运行电压,同时考虑直流电压测量装置的测量误差,此处按照准确度 0.2 级的电压测量装置考虑,感应电压计算参考 F.1.3。

考虑感应电压后的避雷器持续运行电压由公式(F.21)计算:

$$U_{ccov} = 1.002U_{dN} + U_{ac} \quad \dots\dots\dots (F.21)$$

式中:

U_{ac} ——融冰回路中电磁感应电压,单位为千伏(kV)。

本示例中, U_{ac} 取 2 kV,得到避雷器持续运行电压为 22.04 kV。

根据母线避雷器的特性,荷电率 K 通常按照 0.8 考虑,避雷器额定电压最小值由公式(F.22)计算:

$$U_{refmin} = \frac{U_{ccov}}{\sqrt{2} \times K} \quad \dots\dots\dots (F.22)$$

得到避雷器额定电压最小值为 19.48 kV。

根据 GB/T 11032—2020 的附录 D,这里按照交流电压等级 35 kV 选取,额定电压为 51 kV 的避雷器,操作冲击保护水平为 114 kV,雷电冲击保护水平为 134 kV。

c) 绝缘水平确定

模块化多电平直流融冰装置交、直流侧避雷器均按照 35 kV 标准交流电压等级避雷器选取,因此直流融冰装置交流侧、直流侧设备绝缘水平按照 GB/T 311.1 规定的标准绝缘水平选取。本示例中,交流侧、直流侧设备绝缘水平如表 F.5 所示。

表 F.5 某工程模块化多电平直流融冰装置交流侧、直流侧设备绝缘水平

设备	额定雷电冲击耐受电压 (峰值) kV	额定短时工频耐受电压 (方均根值) kV
换流器交流侧设备	200	95
换流器桥臂及直流侧设备	200	95

d) 保护用空气间隙距离计算

根据 6.2.5.10,空气间隙操作冲击 50%放电电压选取为 90%的避雷器操作冲击保护水平:

$$U_{50S} = 90\% \times 114 = 102.6 \text{ kV}$$

雷电冲击 50%放电电压选取为 90%的避雷器雷电冲击保护水平:

$$U_{50L} = 90\% \times 134 = 120.6 \text{ kV}$$

根据 GB/T 311.2 对保护间隙距离近似计算(取棒-棒间隙因数 1.35):

操作冲击间隙:

$$d_s = \frac{\frac{102.6}{e^{1.35 \times 1.080}} - 1}{0.46} = 158 \text{ mm}$$

雷电冲击间隙:

$$d_L = \frac{120.6}{700} = 172 \text{ mm}$$

考虑间隙在操作和雷电过电压下均起到保护作用,间隙值取为操作冲击间隙计算值和雷电冲击间隙计算值中的较小值,即 158 mm。

F.2.4 模块化多电平直流融冰装置设备耐受电流设计方法及示例

F.2.4.1 模块化多电平直流融冰装置设备耐受电流设计流程

模块化多电平直流融冰装置设备耐受电流设计流程如图 F.10 所示。

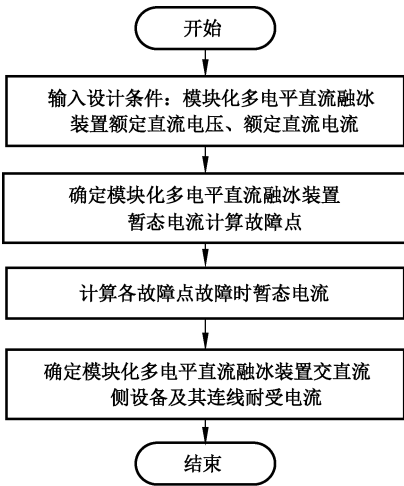


图 F.10 模块化多电平直流融冰装置设备耐受电流设计流程

F.2.4.2 模块化多电平直流融冰装置设备耐受电流设计示例

为 F.2.2 中的某工程模块化多电平直流融冰装置。直流侧不接地,在发生对地短路故障时,故障电流通常较小,一般忽略不计,暂态电流计算考虑的主要故障点如图 F.11 所示,按照如下步骤进行设备耐受电流设计。

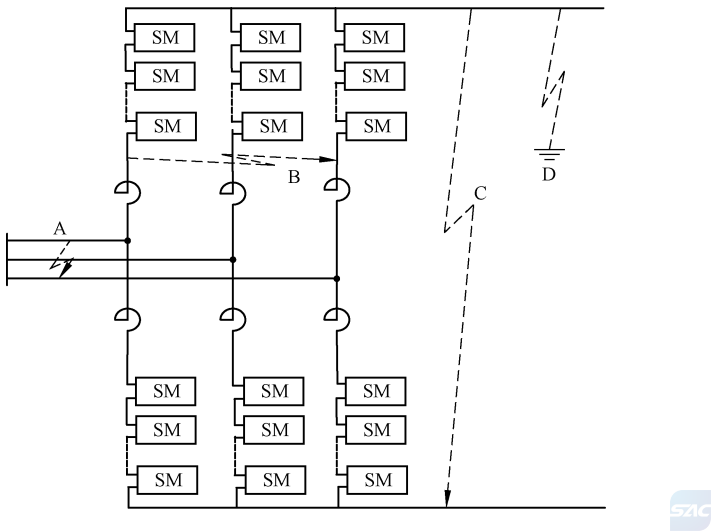


图 F.11 模块化多电平直流融冰装置故障点

- a) 换流器交流侧三相短路(故障 A)故障电流计算
- 对于换流器交流侧的连接母线,发生在换流器交流侧三相短路 A 时产生的短路电流最大。参

考 GB/T 1094.5, 当 X/R 为 14 时, 因数取 2.55, 即三相短路峰值电流 I_{crest1} 等于稳态短路电流的 2.55 倍, 由公式(F.23)计算。

$$I_{\text{crest1}} = \frac{U_{\text{ve}}/\sqrt{3}}{X_{\text{SCA}}} \times 2.55 \quad \dots\dots\dots (\text{F.23})$$

式中:

U_{ve} ——换流器交流侧线电压, 考虑可能的最大值, 单位为千伏(kV);

X_{SCA} ——折算到换流器交流侧的每相阻抗, 包括电网等效阻抗、上一级降压变压器的短路阻抗。考虑苛刻边界, 忽略电网等效阻抗, 单位为欧姆(Ω)。

电网等效阻抗通常按 63 kA 短路电流估算, 变压器阻抗由变压器参数决定。本示例中, 主变压器电压 525 kV/230 kV/35 kV、容量 750 MVA、高-低阻抗电压 55%, 考虑 5% 制造偏差, 则 X_{SCA} 计算如下:

$$X_{\text{SCA}} = 0.95 \times \frac{U_{\text{ve}}^2}{S_{\text{N}}} \times 55\% = 0.95 \times \frac{35^2}{750} \times 55\% = 0.8534 \Omega$$

计算短路电流时, 35 kV 侧电压按照最高运行电压考虑, I_{crest1} 计算如下:

$$I_{\text{crest1}} = \frac{40.5/\sqrt{3}}{0.8534} \times 2.55 = 69.87 \text{ kA}$$

b) 桥臂电抗器与阀之间的三相短路(故障 B)故障电流计算

对于桥臂电抗器和阀之间的连接母线, 发生在桥臂电抗器与阀之间的三相短路 B 时产生的短路电流最大。由公式(F.24)计算:

$$I_{\text{crest2}} = \frac{U_{\text{ve}}/\sqrt{3}}{X_{\text{SCB}}} \times 2.55 \quad \dots\dots\dots (\text{F.24})$$

式中:

U_{ve} ——换流器交流侧线电压有效值, 考虑可能的最大值。

X_{SCB} ——折算到换流器交流侧的每相阻抗, 包括电网等效阻抗、变压器漏抗和桥臂电抗, 桥臂电抗器存在制造偏差, 按 5% 考虑, X_{SCB} 计算如下:

$$X_{\text{SCB}} = X_{\text{SCA}} + 0.95X_{\text{arm}} = 0.8534 + 0.95 \times 314 \times 7.8 \times 10^{-3} = 3.1802 \Omega$$

三相短路峰值电流 I_{crest2} 为:

$$I_{\text{crest2}} = \frac{40.5/\sqrt{3}}{2.0168} \times 2.55 = 18.75 \text{ kA}$$

c) 换流器直流极间短路(故障 C)故障电流计算

在发生换流器直流极间短路时, 模块化多电平直流融冰装置采用全桥子模块, 直流侧短路时直流电流完全受控, 故障电流不会超过最大运行电流 1.1 倍。如不考虑全桥子模块模块化多电平换流器直流侧电流快速控制能力, 换流器将由于过电流保护动作而闭锁(过电流保护定值不超过功率器件可重复峰值集电极电流, 功率器件重复峰值集电极电流常为功率器件集电极电流的 2 倍), 换流器闭锁后, 直流极母线的短路电流将停止增长。直流极母线的故障电流峰值 I_{crest3} 约为功率器件可重复峰值集电极电流的 1.5 倍, 由公式(F.25)计算:

$$I_{\text{crest3}} = 1.5 \times 2 \times I_{\text{C}} \quad \dots\dots\dots (\text{F.25})$$

式中:

I_{C} ——功率器件集电极电流。

本示例中, 模块化多电平换流器阀子模块采用两只 IGBT 器件并联(见 GB/T 31487.2—2025 的附录 C), 器件集电极电流为 1.4 kA。两只器件并联使用后, 由于电流不均匀分布等因素, 考虑按照 10% 降额使用, 即 I_{C} 按 2.5 kA 计, 计算得到换流器直流极间短路故障电流 I_{crest3} 为:

$$I_{\text{crest3}} = 1.5 \times 2 \times I_{\text{C}} = 1.5 \times 2 \times 2.5 = 7.5 \text{ kA}$$

- d) 换流器直流极对地短路(故障 D)故障电流计算
直流侧单点接地,无故障电流。
- e) 设备耐受电流确定
根据以上计算结果,本示例中直流融冰装置设备耐受电流设计要求值如表 F.6 所示。

表 F.6 某工程模块化多电平直流融冰装置设备耐受电流设计要求值

设备	计算值(峰值) kA	短时耐受电流设计要求值 kA	峰值耐受电流设计要求值 kA
换流器交流侧母线	69.87	31.50	80.00
桥臂电抗器及相关设备	18.75	12.50	31.50
直流极母线相关设备	9.00	4.00	10.00

F.3 直流融冰装置主回路典型参数

F.3.1 电网换相直流融冰装置主回路典型参数

电网换相直流融冰装置主回路典型参数如表 F.7 所示。

表 F.7 电网换相直流融冰装置主回路典型参数

直流融冰装置型式	安装地点	融冰对象	网侧额定电压 kV	额定直流电流 A	额定直流电压 kV	额定直流功率 MW	整流变压器(Yyd 或者 Dyd)			平波电抗器 (两台) mH	交流滤波器分 组容量	可融冰导线或地线 最大长度 km
							额定电压 kV	额定容量 MVA	短路阻抗			
电网换相 直流融冰装置	220 kV 变电站	220 kV、 110 kV 导线和地线 500 kV 交流线路导线和地线、 高压/特高压直流 换流站 路地线	10	2 000	10	20	10/4.5/4.5	28/14/14	0.12/0.12	5	滤波器分 组容量 与原件 电容器 组相同	约 50(导线) 约 50(地线)
			35	4 000	20	80	35/8.5/8.5	106/53/5	0.12/0.12	10		约 100(导线) 约 100(地线)
	35		4 000	30	120	35/12.5/12.5	156/78/78	0.12/0.12	15	约 150(导线) 约 150(地线)		
	66		4 000	40	160	66/16.5/16.5	206/103/103	0.12/0.12	20	约 200(导线) 约 200(地线)		
	66		4 000	50	200	66/20.5/20.5	258/129/129	0.12/0.12	24	约 250(导线) 约 250(地线)		
	35		5 000	20	100	35/8.5/8.5	132/66/66	0.12/0.12	10	约 100(导线) 约 100(地线)		
	35		5 000	30	150	35/12.5/12.5	194/97/97	0.12/0.12	15	约 150(导线) 约 150(地线)		
	66		5 000	40	200	66/16.5/16.5	260/130/130	0.12/0.12	20	约 200(导线) 约 200(地线)		
	66		5 000	50	250	66/20.5/20.5	320/160/160	0.12/0.12	24	约 250(导线) 约 250(地线)		
	35		6 000	20	120	35/8.5/8.5	160/80/80	0.12/0.12	11	约 100(导线) 约 100(地线)		
	66		6 000	30	180	66/12.5/12.5	244/117/117	0.12/0.12	15	约 150(导线) 约 150(地线)		
	66		6 000	40	240	66/16.5/16.5	310/155/155	0.12/0.12	20	约 200(导线) 约 200(地线)		
	66		6 000	50	300	66/20.5/20.5	384/192/192	0.12/0.12	24	约 250(导线) 约 250(地线)		

表 F.7 电网换相直流融冰装置主回路典型参数 (续)

直流融冰装置型式	安装地点	融冰对象	网侧额定电压 kV	额定直流 电流 A	额定直流 电压 kV	额定直流 功率 MW	整流变压器(Yyd 或者 Dyd)			平波电抗器 (两台) mH	交流滤波器分 组容量	可融冰导线或地线 最大长度 km
							额定电压 kV	额定容量 MVA	短路阻抗			
电网换相 直流融冰 装置	高压/特高压 直流换流站	高压/特高压 直流换流站 流站地线	35	500	30	15	35/12.5/12.5	20/10/10	0.12/0.12	5		约 150(导线) 约 150(地线)
			35	500	40	20	66/16.5/16.5	26/13/13	0.12/0.12	7		约 200(导线) 约 200(地线)
			35	500	50	25	66/20.5/20.5	258/129/129	0.12/0.12	8	滤波器分 组容量与 电容器 组相同	约 250(导线) 约 250(地线)
			35	1 000	30	30	35/12.5/12.5	80/40/40	0.12/0.12	11		约 150(导线) 约 150(地线)
			35	1 000	40	40	66/16.5/16.5	52/26/26	0.12/0.12	14		约 200(导线) 约 200(地线)
			35	1 000	50	50	66/20.5/20.5	64/32/32	0.12/0.12	17		约 250(导线) 约 250(地线)
<p>注 1：导线融冰长度按照两相导线串联估算，对于两相导线并联后与另一相线串联融冰长度增加 1/3。</p> <p>注 2：地线融冰长度按单段地线通过相线接入直流融冰装置估算，忽略导线电阻。</p> <p>注 3：如果采用导线不停电地线融冰，两并行地线串联后接入直流融冰装置，融冰距离为表中数据的 1/2。</p>												

F.3.2 模块化多电平直流融冰装置主回路典型参数

模块化多电平直流融冰装置主回路典型参数如表 F.8。

表 F.8 模块化多电平直流融冰装置主回路典型参数

直流融冰装置型式	安装地点	融冰对象	网侧额定电压 kV	额定直流电流 A	额定直流电压 kV	额定直流功率 MW	桥臂电抗器 mH	静止同步补偿额定容量 Mvar	可融冰导线或地线最大长度 km
模块化多电平直流融冰装置	220 kV 变电站	220 kV、110 kV 导线和地线	10	2 000	10	20	3.2	30	约 50(导线);约 50(地线)
	500 kV 交流变电站、高压/特高压直流换流站	500 kV 交流线路导线和地线、高压/特高压直流线路地线	35	4 000	20	80	7.8	180	约 100(导线);约 100(地线)
			35	4 000	30	120	5.2	200	约 150(导线);约 150(地线)
			35	4 000	40	160	3.9	200	约 200(导线);约 200(地线)
			35	4 000	50	200	4.1	200	约 250(导线);约 250(地线)
			35	5 000	20	100	6.2	200	约 100(导线);约 100(地线)
			35	5 000	30	150	4.2	200	约 150(导线);约 150(地线)
			35	5 000	40	200	3.1	200	约 200(导线);约 200(地线)
			66	5 000	50	250	8.9	250	约 250(导线);约 250(地线)
	高压/特高压直流换流站	高压/特高压直流地线	35	6 000	20	120	5.2	200	约 100(导线);约 100(地线)
			35	6 000	30	180	3.5	200	约 150(导线);约 150(地线)
			66	6 000	40	240	9.2	240	约 200(导线);约 200(地线)
			66	6 000	50	300	7.4	300	约 250(导线);约 250(地线)
			35	500	30	15	41.6	25	约 150(导线);约 150(地线)
			35	500	40	20	31.2	25	约 200(导线);约 200(地线)
			35	500	50	25	33	30	约 250(导线);约 250(地线)
			35	1 000	30	30	20.8	50	约 150(导线);约 150(地线)
			35	1 000	40	40	16.5	55	约 200(导线);约 200(地线)
			35	1 000	50	50	12.5	60	约 250(导线);约 250(地线)

附录 G

(资料性)

直流融冰装置的典型保护配置

G.1 电网换相直流融冰装置典型保护配置

G.1.1 交流过电流保护

通过测量直流融冰装置换流器阀侧交流电流,检测换流设备的过电流。保护动作的结果是:根据过电流的程度选择立即或延时闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.1.2 交流欠电压保护

检测交流欠电压,在交流故障清除时间内,暂时闭锁换流器或者降低输出直流功率,故障清除后恢复直流融冰装置正常运行。保护动作的结果是:产生交流低电压信号,发送至相关控制功能和其他保护功能。

G.1.3 阀短路保护

用于阀短路故障或换流变阀侧相间故障的保护。保护动作的结果是:立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.1.4 直流过电流保护

通过测量直流电流,检测换流设备的过电流。保护动作的结果是:根据过电流的程度选择立即或延时闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.1.5 直流过电压保护

检测直流融冰装置直流侧正极和负极的直流过电压,保护直流设备免受直流过电压的损坏。保护动作的结果是:立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.1.6 直流欠电压保护

检测直流融冰装置正常运行时直流侧正极和负极出现的直流低电压,在异常运行工况下保护直流设备,作为直流接地故障的后备保护。保护动作的结果是:立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.1.7 直流断线保护

通过检测直流电流、直流电压以及触发角的突变情况,对融冰线路的断线故障进行保护。保护动作的结果是:立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.1.8 直流谐波保护

检测交流系统故障或控制系统故障引起直流电流中的异常谐波。保护动作的结果是:根据谐波的含量选择报警,或延时闭锁换流器、断开交流进线断路器。

G.1.9 直流电压差动保护

根据直流融冰装置直流侧正极和负极直流电压,检测整个直流融冰系统发生不对称运行情况。保

保护动作的结果是:根据直流侧实际负载情况和差值选择报警,或闭锁换流器、断开交流进线断路器。

G.1.10 阻抗保护

检测融冰交流线路直流电阻的测量值与设计值之间是否存在较大差异,以确认交流线路是否发生故障。保护动作的结果是:报警。

G.1.11 开路试验保护

直流融冰装置在进行开路试验时,检测阀厅、直流侧设备及融冰母线的接地故障。保护动作的结果是:立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.1.12 晶闸管冗余不足保护



实时检测晶闸管故障数量。保护动作的结果是:根据故障晶闸管的数量,选择报警或立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.1.13 冷却系统异常保护

实时检测冷却系统异常,包括进水温度异常、出水温度异常、冷却水流量异常、冷却水电导率异常、液位异常、电源故障、主循环泵故障、水冷控制系统故障等。保护动作的结果是:接收到冷却系统硬节点或者通信接入传递的异常信号,立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.1.14 换流变压器保护

测量换流变压器的电气量及非电气量,检测与换流变压器相关的故障和异常。保护动作的结果是:根据故障和异常的情况,选择报警或立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.1.15 交流滤波器保护

测量交流滤波器的电气量,检测与电抗、电容和谐振频率相关的故障和异常。保护动作的结果是:根据故障和异常的情况,选择报警或立即断开交流滤波器组断路器,闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2 模块化多电平直流融冰装置典型保护配置

G.2.1 交流过电流保护

通过测量直流融冰装置换流器阀侧交流电流,检测换流设备的过电流。保护动作的结果是:根据过电流的程度选择立即或延时闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.2 启动回路过电流保护

通过测量直流融冰装置启动过程中,启动电阻器的预充电电流,检测启动回路的过电流。保护动作的结果是:在换流器带电过程中,若启动回路电流超过保护定值,立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.3 交流过电压保护

检测交流过电压,在交流故障清除时间内,暂时闭锁换流器或者降低输出直流功率,故障清除后恢复直流融冰装置正常运行。保护动作的结果是:产生交流过电压信号,发送至相关控制功能和其他保护功能。

G.2.4 交流欠电压保护

检测交流欠电压,在交流故障清除时间内,暂时闭锁换流器或者降低输出直流功率,故障清除后恢复直流融冰装置正常运行。保护动作的结果是:产生交流欠电压信号,发送至相关控制功能和其他保护功能。

G.2.5 频率异常保护

检测交流频率超出正常工作范围,暂时闭锁换流器或者降低输出直流功率,故障清除后恢复直流融冰装置正常运行。保护动作的结果是:产生频率异常保护信号,发送至相关控制功能和其他保护功能。

G.2.6 桥臂电抗器差动保护

用于桥臂电抗器接地保护。保护动作的结果是:立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.7 桥臂差动保护

用于换流器桥臂接地短路保护。保护动作的结果是:立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.8 阀短路保护

用于阀短路故障或换流变阀侧相间故障的保护。保护动作的结果是:立即闭锁阀,断开交流进线断路器。



G.2.9 直流过电流保护

通过测量直流电流,检测换流设备的过电流。保护动作的结果是:根据过电流的程度选择立即或延时闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.10 直流过电压保护

检测直流融冰装置直流侧正极和负极的直流过电压,保护直流设备免受直流过电压的损坏。保护动作的结果是:立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.11 直流欠电压保护

检测直流融冰装置在正常运行时直流侧正极和负极出现的直流低电压,在异常运行工况下保护直流设备,作为直流接地故障的后备保护。保护动作的结果是:立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.12 直流断线保护

通过在带线路正常融冰工况下检测直流电流、直流电压的突变情况,对融冰线路的断线故障进行保护。保护动作的结果是:立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.13 直流电压差动保护

根据直流融冰装置直流侧正极和负极直流电压检测整个直流融冰系统发生不对称运行情况。保护动作的结果是:根据电压差的不同,选择报警,立即或延时闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.14 阻抗保护

检测融冰交流线路直流电阻的测量值与设计值之间是否存在较大差异,以确认交流线路是否发生故障。保护动作的结果是:报警。

G.2.15 开路试验保护

直流融冰装置在进行开路试验时,检测阀厅、直流侧设备及融冰母线的接地故障。保护动作的结果是:立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.16 子模块冗余不足保护

直流融冰装置在运行过程中由于子模块故障导致故障模块个数超过冗余配置个数。保护动作的结果是:立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.17 子模块过电压保护

直流融冰装置在运行过程中子模块直流电容电压超过保护定值。保护动作的结果是:冗余模块足够的情况下,进行模块旁路,直流融冰装置继续运行。若旁路个数超限,立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.18 子模块过温保护

直流融冰装置在运行过程中子模块功率器件温度超过保护定值。保护动作的结果是:冗余模块足够的情况下,进行模块旁路,直流融冰装置继续运行。若旁路个数超限,立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.19 子模块通信故障保护

直流融冰装置在运行过程中子模块与阀控装置通信中断。保护动作的结果是:若上行通信故障,立即闭锁换流器,断开交流进线断路器;若下行通信故障,冗余模块足够的情况下,则进行模块旁路,直流融冰装置继续运行,当旁路个数超限,立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

G.2.20 冷却系统异常保护

实时检测冷却系统异常,包括进水温度异常、冷却水流量异常、冷却水电导率异常、液位异常、电源故障、主循环泵故障、水冷控制系统故障等。保护动作的结果是:接收到冷却系统硬节点或者通信接入传递的异常信号,立即闭锁换流器,断开交流进线断路器。

附录 H
(资料性)
导线和地线直流融冰流程

H.1 线路停电导线直流融冰流程

线路停电导线直流融冰流程如图 H.1 所示。将融冰线路转为冷备用状态,断开线路高压并联电抗器隔离开关(如有)后,直流融冰装置已经从检修状态转为冷备用状态。通过合上导线两侧融冰隔离开关,将融冰导线接入处于冷备用状态的直流融冰装置。直流融冰装置依次操作至交流侧热备用状态、热备用状态、运行状态对导线进行融冰。不同相序导线切换可在直流融冰装置热备用状态进行。融冰完成后,依次将直流融冰装置操作至热备用状态、交流侧热备用状态、冷备用状态,断开线路两侧融冰隔离开关将线路操作至冷备用状态,合上线路高压并联电抗器隔离开关(如有),即可恢复线路运行。

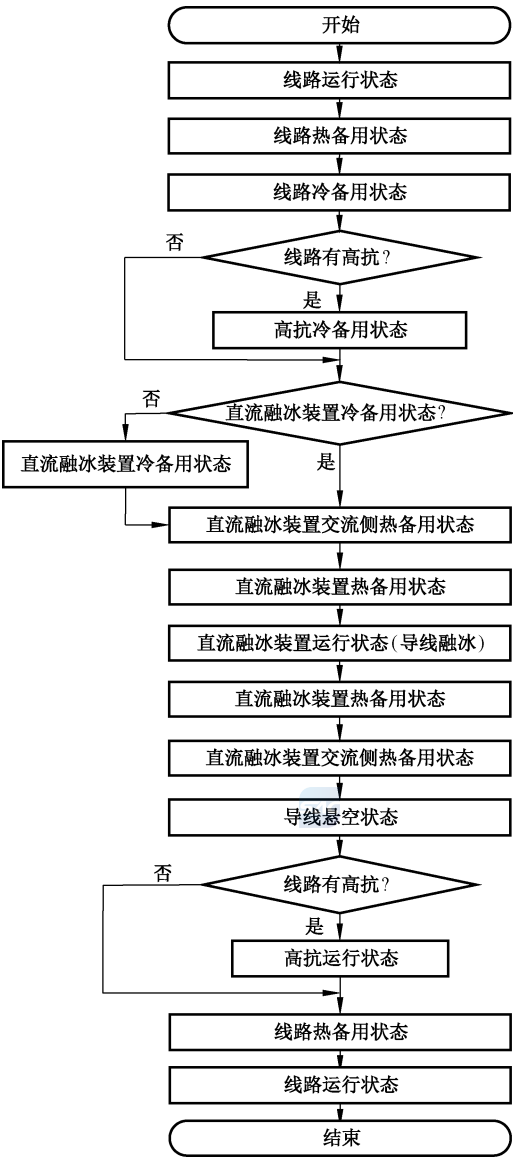


图 H.1 交流线路停电导线直流融冰流程

H.2 线路停电地线直流融冰流程

线路停电地线直流融冰流程如图 H.2 所示。将线路转为冷备用状态,断开线路高压并联电抗器隔离开关(如有)和地线接地开关后,依次合上导线和地线联络隔离开关、融冰母线线路侧隔离开关、融冰母线装置侧隔离开关,将融冰地线接入处于冷备用状态的直流融冰装置,并将直流融冰装置依次操作至交流侧热备用状态、热备用状态、运行状态对地线进行融冰。融冰完成后,依次将直流融冰装置操作至热备用状态、交流侧热备用状态、冷备用状态,断开线路两侧融冰隔离开关将线路操作至冷备用状态,合上地线接地开关,合上线路高压并联电抗器隔离开关(如有),即可恢复线路运行。各地线段融冰转换时,直流融冰装置宜处于交流侧热备用状态。

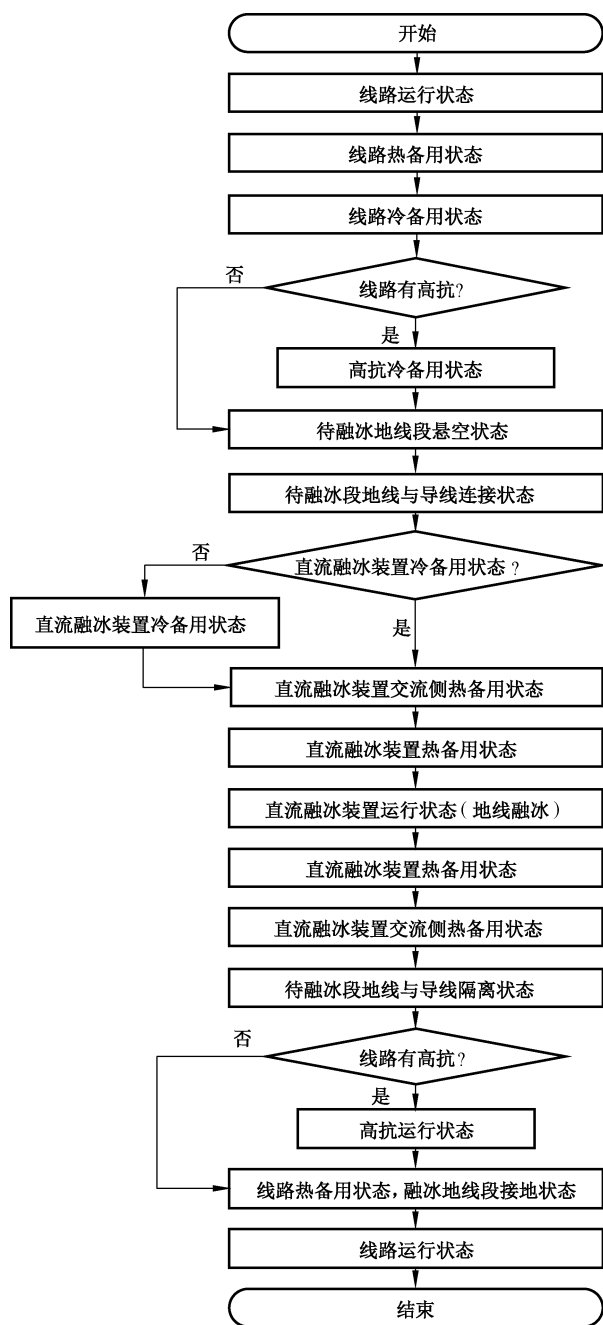


图 H.2 线路停电地线直流融冰流程

H.3 线路不停电地线直流融冰流程

线路不停电地线直流融冰流程如图 H.3 所示。断开地线接地开关,直流融冰装置已经从检修状态转为冷备用状态,依次合上地线和引接线联络隔离开关、融冰母线线路侧隔离开关、融冰母线装置侧隔离开关,将融冰地线通过地线融冰引接线接入处于冷备用状态的直流融冰装置,并将直流融冰装置依次操作至交流侧热备用状态、热备用状态、运行状态对地线进行融冰。融冰完成后,依次将直流融冰装置依次操作至热备用状态、交流侧热备用状态、冷备用状态,依次断开融冰母线装置侧隔离开关、融冰母线线路侧隔离开关、导线和地线联络隔离开关,合上地线接地开关即可恢复至正常运行状态。融冰作业全部完成后,直流融冰装置可转为检修状态。

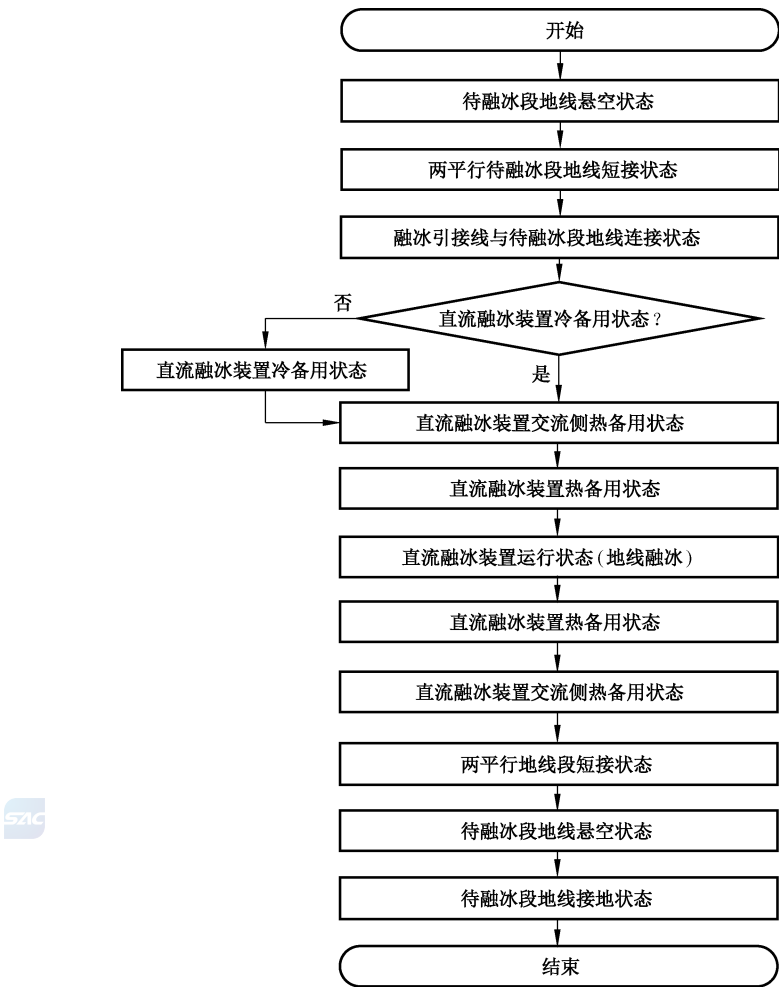


图 H.3 线路不停电地线直流融冰流程

参 考 文 献

- [1] GB/T 1094.5 电力变压器 第5部分:承受短路的能力
 - [2] GB/T 34118—2017 高压直流系统用电压源换流器术语
 - [3] DL/T 2284 车载移动式变电站运行与维护规范
-

