团体标准

ICS 27.160

CCS F01

|  |
| --- |
|   |

T/CSEE XXXX-2025

|  |
| --- |
|  |

风力发电机组叶片电热除冰技术导则

|  |
| --- |
| Technical guideline for electrothermal de-icing of wind turbine blades |
| （征求意见稿） |

2025-XX - XX发布

2025- XX- XX实施

中国电机工程学会   发布

目  次

[前  言 II](#_Toc25340)

[1 范围 1](#_Toc23661)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc31069)

[3 术语和定义 2](#_Toc29178)

[4 总体要求 2](#_Toc6219)

[5 适用性分析 2](#_Toc14730)

[6 电热除冰系统 4](#_Toc2851)

[7 安装 5](#_Toc24715)

[8 系统维护 6](#_Toc812)

[9 除冰评价 6](#_Toc28264)

[附　录　A （资料性附录） 电热除冰系统设计建议 8](#_Toc16457)

前  言

本文件按照《中国电机工程学会团体标准管理办法》的要求，依据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。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国电机工程学会提出。

本文件由中国电机工程学会\*\*\*\*专业委员会技术归口并解释。

本文件起草单位：\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*、\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*、\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

本文件主要起草人：\*\*、\*\*\*、\*\*\*、\*\*、\*\*\*、\*\*\*、\*\*、\*\*\*、\*\*\*。

本文件为首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电机工程学会标准执行办公室（地址：北京市西城区白广路二条1号，100761，网址：http://www.csee.org.cn，邮箱：cseebz@csee.org.cn）。

风力发电机组叶片电热除冰技术导则

1. 范围

本文件规定了风力发电机组叶片电热除冰系统的技术要求、基本组成、安装与维护要求，以及除冰效果评价方法。

本文件适用于新增和在役风力发电机组叶片电热除冰技术的设计、应用、维护及效果评价等。

1. 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。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 4208 外壳防护等级（IP代码）

GB/T 18802.1 低压电涌保护器（SPD）.第1部分：低压配电系统的电涌保护器.性能要求和试验方法

GB/T 19271 雷电电磁脉冲的防护

GB/T 19963.1 风电场接入电力系统技术规定

GB/T 25383 风力发电机组 风轮叶片

GB/T 21714.2 雷电防护 第2部分：风险管理

GB 50343-2012 建筑物电子信息系统防雷技术规范

DL/T 5509 架空输电线路覆冰勘测规程

JB/T 7486 温度传感器系列型谱

NB/T 10211 风力发电机组叶片电加热防/除冰控制系统技术规范

NB/T 10561 风力发电机叶片检修规范

IEC 61400-12-1 风力发电机组 功率特性测试

IEC 61400-24 风力发电机组 第24部分:雷电防护

1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

* 1. 电热除冰系统 electric heating deicing system

通过在叶片壳体上铺设电加热元件并通电发热，将热量传递到叶片外表面以实现除冰的装置。该系统包含电加热元件、供电系统、控制系统及其他必要的辅助设备。

* 1. 覆冰期 instrumental icing duration

风力发电机组一年统计周期内处于覆冰状态的时间。

发电效率 power generation efficiency
 风力发电机组实际发电量与理论发电量的比值。

挽回凝冰损失率 recovery rate of icing loss

安装电热除冰系统的风力发电机组与对比未安装或未除冰风力发电机组在覆冰期内的发电效率比值。

1. 总体要求
	1. 风力发电机组叶片电热除冰系统的设计、安装及运行应遵循安全可靠的原则。
	2. 在保证风力发电机组结构安全和运行稳定的前提下，应最大限度降低叶片覆冰对发电效率的影响。
	3. 电热除冰系统应与风力发电机组及叶片的原有结构和控制系统相容，避免对机组运行产生不利影响。
	4. 电热除冰系统的设计应根据风场所在地的特殊环境条件（如高海拔、高盐雾、强雷暴等）进行针对性的校核和适应性设计，以确保在各种极端环境下系统均能有效运行。
2. 适用性分析
	1. 覆冰期数据收集
		1. 应收集与机组结构及电气系统相关的基础数据,包括风力发电机组生产厂家、型号、容量、供电电压、电缆规格、滑环规格，叶片生产厂家、型号、长度、接闪器数量、内部结构等。
		2. 应收集风力发电机组覆冰期间的气象及运行数据，包括机组所在地的海拔和地形特征、环境气温、相对湿度、覆冰期风速、年雷暴日数等。
		3. 应统计机组覆冰期的持续时间，并根据覆冰期间实际风功率曲线计算风力发电机组因覆冰造成的发电量损失和等效停机时长等数据。
		4. 应收集覆冰期内叶片表面覆冰状态的影像资料，以及脱落冰块的重量、形状、密度等数据。
		5. 应收集因风力发电机组叶片覆冰造成的次生危害数据，包括因叶片甩冰导致的机舱、轮毂或变压器等设备损坏，输电线路损坏，以及冰块坠落造成的安全隐患等情况。
	2. 覆冰程度分析
		1. 应根据覆冰类型、覆冰厚度以及风力发电机组安装地形等因素综合判定风力发电机组覆冰的严重程度，可参考DL/T 5509的要求对覆冰严重程度进行分析。
		2. 可依据覆冰的密度和形态判定覆冰类型，见表5-1。

表5-1 覆冰密度范围

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 密度范围（g/cm³） | 0.7-0.9 | 0.1-0.3 | 0.2-0.6 | 0.2-0.4 |
| 覆冰类型 | 雨凇 | 雾凇 | 雨雾淞混合冻结 | 湿雪 |

* + 1. 按覆冰厚度可将覆冰程度分级，见表5-2。

表5-2 覆冰厚度分级

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 覆冰程度 | 低 | 中 | 重 |
| 覆冰厚度（mm） | ＜10 mm | 10 mm-20 mm | ＞20 mm |

* + 1. 不同地形条件下覆冰的放大系数范围见表5-3。

表5-3 不同地形条件下的覆冰放大系数

|  |  |
| --- | --- |
| 地形类别 | 系数范围 |
| 一般地形 | 1.0 |
| 风口或风道 | 2.0-3.0 |
| 迎风坡 | 1.2-2.0 |
| 山岭 | 1.0-2.0 |
| 背风坡/山麓 | 0.5-1.0 |
| 山间平坝 | 0.7 |

* 1. 雷击风险评估
		1. 地区雷暴日等级应根据年平均雷暴日数划分，参考GB 50343。
		2. 地区雷暴日数应以国家公布的当地年平均雷暴日数为准。
		3. 按年平均雷暴日数，地区雷暴日等级宜划分为少雷区、中雷区、多雷区、强雷区。
		4. 应参考GB 50343及GB/T 21714.2评估覆冰风力发电机组雷击风险。
1. 电热除冰系统
	1. 系统构成
		1. 风力发电机组叶片电热除冰系统的应至少包括以下子系统：电加热元件、供电系统、控制系统、覆冰监测系统及其他必要的辅助设备。
	2. 电加热元件
		1. 电加热元件宜采用面发热材料，最高工作温度不得超过叶片材料最高耐热温度。
		2. 电加热元件的使用寿命不应低于叶片的使用寿命。
		3. 电热除元件在布局应充分考虑叶片各部位气动条件的差异（如叶尖与叶根的线速度差异）以及不同部位覆冰严重程度的不同，并针对覆冰特性进行差异化设计。
	3. 供电电源
		1. 电热除冰系统的供电电源应满足GB/T 19963.1对风电场并网电源的相关要求：

—电压范围：标称值±10%；

—频率范围：标称值±2%；

—电压不平衡：电压负次序成分比例不超过2％。

* + 1. 在特殊情况下，如果风力发电机组所接入的电网电源存在电压或频率不稳定等问题，应根据电网实际情况对电热除冰系统进行设计调整和校核，确保系统适应电源的波动。
		2. 电热除冰系统的电源接引及整体布置方案应从机组本身运行安全出发，兼顾系统经济性。
		3. 供电电源应独立于整机控制系统并在风力发电机组内部与风力发电机组的变桨、偏航等电源回路保持电气隔离。
		4. 在必须与机组原有供电系统连接的情况下，应通过设计保护回路，防止任何电热除冰系统供电故障危及机组的安全运行。
		5. 电热除冰系统应在风力发电机组塔基及机舱设置电源分断开关或隔离开关。
	1. 雷电防护
		1. 电热除冰系统的供电、通信、控制回路均必须做雷电防护及电涌保护设计，可参考GB/T 19271及GB/T 18802.1相关规定。
		2. 电热除冰系统的雷击防护区域及防护等级应参考IEC 61400-24要求。
	2. 覆冰监测
		1. 电热除冰系统宜配备覆冰监测装置，也可从风力发电机组控制系统中获取机组覆冰状态信息，判断风力发电机组覆冰状态。
		2. 覆冰监测可以采用以下一种或多种方法

a) 环境温湿度监测；

b) 测冰传感器，包括但不限于光纤、超声波等监测方式；

c) 视频监控或图像识别等。

* + 1. 覆冰监测使用的温度传感器应符合JB/T 7486和GB/T 4208的要求。若有特殊技术约定，传感器的技术指标应满足除冰系统所需的环境适应性、测量精度、使用寿命和可靠性要求；在无特殊技术约定时，传感器至少应满足以下指标：

a) 设计寿命：≥5年；

b) 分度：≤0.1℃；

c) 防护等级：IP67；

d) 测温范围：-40~80℃。

* 1. 控制系统
		1. 电热除冰控制系统应根据机组运行状态、发电效率、风速、环境温度湿度或覆冰状态等因素控制电加热的启停。除冰启停控制可采用以下方式：
1. 手动控制启停；
2. 机组根据覆冰状态自动启停除冰系统。
	* 1. 应为电加热元件配置温度传感器或温度保护开关,控制温度不能超过限定上限温度。
		2. 应在风电场升压站或集控中心部署电热除冰系统的远程监控上位机。远程监控系统可集成到风力发电机组的SCADA系统中，也可通过独立的服务器和通信设备实现。
		3. 电热除冰系统的控制功能和安全保护应符合NB/T 10211-2019中关于叶片电加热防/除冰控制系统的规定。
3. 安装
	1. 一般要求
		1. 安装电热除冰系统部件时，应确保新安装的部件不影响叶片和机组的结构安全以及信号传输。如果可能产生影响，必须获得叶片或机组设计单位的确认。
		2. 如需对叶片进行开孔、切割等改动，应确保被改动部位的结构安全，并对改动部位进行可靠的修复补强，按照GB/T 25383的规定进行结构强度校核，提供结构安全评估报告。
		3. 电热除冰系统应满足风力发电机组使用环境条件下的要求，包括自身结构强度、部件连接结构强度及耐候性等。
	2. 粘接要求
		1. 若电热除冰系统部件的安装需要采用手糊或灌注等粘接工艺，其施工工艺及质量标准符合NB∕T 10561要求。
		2. 电热除冰系统电加热元件采用手糊/灌注等粘接工艺时，应提供相应的粘接性能测试报告。
	3. 电缆铺设要求
		1. 在叶片内部铺设电缆时，应考虑叶片的受力形变以及防雷引下线要求，合理布置和固定电缆，确保电缆及系统运行安全。
		2. 在机舱、轮毂和塔筒内部铺设电缆时，应进行电缆固定，保证机组运行过程中的电缆稳定性。
		3. 电缆引入叶片时应设计防扭转装置，保证叶片变桨运动时电缆不受拉扯扭曲，运行可靠。
4. 系统维护
	1. 巡检要求
		1. 电热除冰系统安装投运后应定期巡检。首次巡检应在系统投运后6个月内完成，此后应至少每12个月巡检一次。
		2. 巡检内容应包括对电加热元件与叶片粘接处的检查、控制柜及相关固定件的牢固程度检查，以及电气元件导通性能的检查等。
	2. 系统试运行检查
		1. 覆冰期结束后，电热除冰系统停止运行，应断开除冰系统的主电源。
		2. 电热除冰系统至少每隔6个月应进行一次通电试运行。
		3. 在试运行过程中，应检查并确认电热除冰系统的工作电压、电流、功率和温度等参数均正常。
5. 除冰评价
	1. 一般要求
		1. 风力发电机组叶片电热除冰系统的评价可采用效果验证或者性能验证的方法。
		2. 优先采用效果验证方式进行对系统进行评价。当现场条件不具备效果验证要求时，可采用性能验证方式进行。
	2. 效果验证方法
		1. 风力发电机组叶片电热除冰系统的除冰效果可通过发电效率和挽回凝冰损失率进行评价。
		2. 机组发电效率计算方法如下：

$$y=\frac{Wa}{Wb}$$

式中：

$y$—风力发电机组发电效率；

$Wa$—风力发电机组实际发电量，单位为kWh；

$Wb$—风力发电机组理论发电量，单位为kWh。

* + 1. 机组挽回凝冰损失率如下：

$$r=\frac{\left(y1-y0\right)}{1-y0}$$

式中：

$r$—挽回凝冰损失率；

$y1$—安装电热除冰系统的风力发电机组在覆冰期内的发电效率；

$y0$—对照或自身无电热除冰时风力发电机组在覆冰期内的发电效率。

* + 1. 发电效率自身对比方法

在安装电热除冰系统的风力发电机组上，利用机组SCADA系统收集覆冰期内的运行数据，参考IEC 61400-12-1。对比同一台风力发电机组在除冰系统启用与未启用状态下的发电效率差异，并据此计算挽回凝冰损失率。

* + 1. 发电效率对照机组对比方法

在风电场内选取与测试机组同型号、地形相似、风资源接近的风力发电机组作为对照机组，参照机组不得少于2台，安装电热除冰系统机组与对照机组在相同覆冰期内的发电效率差异，并据此计算挽回凝冰损失率。

* + 1. 当挽回凝冰损失率r > 0时表示电热除冰系统在覆冰期间提升了发电效率，r值越大代表除冰效果越明显。
	1. 性能验证方法
		1. 性能验证在风力发电机组停机状态下进行。
		2. 机组停机并启动电热除冰系统，测试电加热元件铺设区域的叶片表面温度升高是否达到≥10℃。
		3. 测量电热除冰系统运行时电加热元件铺设区域的功率密度是否达到设计指标值。
1. （资料性附录）
电热除冰系统设计建议

电热除冰系统电气连接设计如图A.1所示。



图A.1电热除冰系统电气连接设计