

团 体 标 准

T/GSEE

风力发电场区域防雷技术规范

Technical Standard for Regional Lightning Protection of Wind Farms

(征求意见稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

广东省电机工程学会

发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 一般要求	7
5 现场勘察	8
5.1 基本要求	8
5.2 风电场的分类	8
5.3 雷电数据资料	8
5.4 雷击路径的划分	8
5.5 雷电拦截点的选择	9
5.6 风电场基本数据	12
6 雷击风险评估	13
6.1 风电场雷击风险源	13
6.2 风险源与风险因子	13
6.3 风险因子赋值	14
6.4 风险等级划分	18
6.5 风险等级划分的原则及使用要求	18
7 直接雷击防护设计	19
7.1 保护范围	19
7.2 雷电拦截器的保护半径 r 的值	20
7.3 特殊条件下保护半径 r 的调整	20
7.4 多个雷击路径时保护半径 r 的确定	21
7.5 初步设计图纸	21
8 雷电强电磁脉冲防护设计	22
8.1 风机发电系统	22
8.2 风机配电系统（400V）	22
8.3 集电线路、升压站	22
8.4 光缆端口	23
9 自然雷电监测系统	23

T/GSEE

10 雷电拦截器现场安装及运维要求.....	23
10.1 现场安装	23
10.2 运维	24
10.3 施工安全要求	24
附 录 A（规范性） 雷电拦截器的工作原理及技术参数.....	25
附 录 B（资料性） 雷电拦截器对雷击点电流的衰减效率.....	27
附 录 C（规范性） 多脉冲电涌保护器 MSPD 和高能吸收器 HEA 的技术参数	29
附 录 D（规范性） 风电场区域防雷装置检测项目及技术指标.....	33

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。

本文件的发布机构提请注意，声明符合本文件时，可能涉及到区域防雷技术、雷电拦截器、多脉冲电涌保护器相关专利的使用。

本文件的发布机构对于该专利的真实性、有效性和范围无任何立场。

该专利持有人已向本文件的发布机构承诺，他愿意同任何申请人在合理且无歧视的条款和条件下，就专利授权许可进行谈判。该专利持有人的声明已在本文件的发布机构备案。相关信息可以通过以下联系方式获得：

专利持有人：佛山市顺德区伦教金盾防雷技术发展有限公司。

地址：广东省佛山市顺德区伦教街道羊大路1号。

联系人：黄昱。

联系方式：0757-27836172。

请注意除上述专利外，本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别其它专利的责任。

本文件由广东省风力发电有限公司提出。

本文件由广东省电机工程学会归口。

本文件起草单位：广东省风力发电有限公司、广东省能源集团有限公司、广东粤电阳江海上风电有限公司、佛山市顺德区伦教金盾防雷技术发展有限公司、中广核新能源投资(深圳)有限公司华南分公司、广东国能龙源新能源有限公司、华润电力广东新能源公司、南京信息工程大学、南方电网电力科技股份有限公司、广东海洋大学、广州理工学院、中国气象局雷电野外科学试验基地、广东省气象局、广州市气象局、茂名市气象局、广东百立防雷科技有限公司、广东粤电湛江风力发电有限公司、大唐集团新能源股份有限公司广东分公司、华能新能源股份有限公司广东分公司、大唐集团新能源股份有限公司广东分公司、三峡集团广东分公司、广州发展新能源股份有限公司、广东省风力发电有限公司湖南分公司、广东省风力发电有限公司内蒙古分公司。

本文件主要起草人：杨少杰、张尤君、杨熙、高子钦、李家锋、李秋鹏、熊凯、王义国、李劲、李高、丘翊仙、公方涛、陈珍、郭仁宏、潘晓庆、裴莹、杨赠儒、黄昱、陈锐良、徐启腾、杨晖、陈绿文、黄校贵、颜志、黎兆东、冯伟翔、黄冬至、肖稳安、徐峰、行九晖、陈青山、朱文峰、颜云、曾志煜、黄伟、王剑彬、吴天中、龙海洪、孟遂民、宋国炜、夏颂成、程文锋、段少俊、肖彬、王元强、苏柱坚。

本文件为首次发布。

T/GSEE

风力发电场区域防雷技术规范

1 范围

本文件制定了海上、陆地风电场区域防雷现场勘测、雷击风险评估、工程设计、施工的基本方法以及运维的技术要求。

本文件适用于新建海陆风电场的防雷设计和已建海陆风电场的防雷技术改造。风力发电机、箱式变压器等生产制造厂，光伏发电场、高压架空输电线路、发电厂、变电站、低压配电系统，索道缆车可参照执行。

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 50057—2010 建筑物防雷设计规范
- YD/T 901—2018 通信用层绞式室外光缆
- T/GZLY 3—2022 楼宇建筑防雷技术评价指南
- T/CMSA 45—2023 雷电多脉冲试验通用准则
- T/LYCY 4062-2024 森林区域雷电拦截技术规范
- T/ASC 6004—2022 低压配电系统的多脉冲电涌保护器-性能要求和试验方法
- IEC 61400-24:2019 Wind energy generation systems - Part 24: Lightning protection
- IEC 61643-11:2011/2PFG Additional test for Multi-pulses Surge protective devices connected to low-voltage power systems-Requirements and test methods
- IEC 62305-2:2010 Protection against lightning - Part 2: Risk management
- NFC 17-102:2011 Protection against lightning: Early streamer emission lightning protection systems

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

风电场 wind farms

由风力发电系统、高压送电系统、光纤环网系统组成的发电场所。

3.2

风电机组 wind turbine

主要由风轮-机舱组件和支撑结构两部分组成，把风能转变为电能的设备。

[来源：陈达，等.《海上风电机组基础结构》[M].北京:中国水利水电出版社,2023]

3.3

T/GSEE

箱式变压器（组合式变压器） Combined transformers for wind turbine

把风电机组发电电压（690V）升压（35kV）后送到升压站的箱式变压器。

3.4

集电线路 transmission lines

风电场风电机组之间的连接线路。

[来源：郑明,等.《风电场防雷与接地》[M].北京:中国水利水电出版社,2016]

3.5

升压站 booster station

集合各风电机组箱变电源（35kV），把其升压（110kV/220kV）并送到电网的控制中心。

[来源：郑明,等.《风电场防雷与接地》[M].北京:中国水利水电出版社,2016]

3.6

光纤环网通信系统 fiber optic ring network communication system

基于光纤传输技术的风电场通信网络系统，由多个风机节点、终端机和光缆线路组成一个双向环形拓扑结构。

[来源：yang yan,etal.Analysis on Lightning strike Cause of Directly Buried Optical Cable in windFarm and Its Prevention Methods[J].Meteorological and Environmental Research, 2022 , 13(3): 67 -70]

3.7

光缆 fiber-optic cable

用于传送光信号的电缆。

[来源：GB 51158-2015,3.2.1]

3.8

热雷暴 thermal thunderstorm

由地面接收太阳辐射所致，也称夏季雷暴，热带地区和中纬度夏季经常发生。特点：一般发生在午后或傍晚，水平尺度小，垂直尺度大。

[来源：郟秀书,张其林,袁铁,等.雷电物理学[M].北京:科学出版社,2016]

3.9

锋面雷暴 frontal thunderstorm

由冷暖气团交汇产生斜压大气不稳定所致，主要发生在中高纬度地区。特点：一天中的任何时刻都可以发生，水平尺度大，垂直尺度小。

[来源：郟秀书,张其林,袁铁,等.雷电物理学[M].北京:科学出版社,2016]

3.10

地形雷暴 topographic thunderstorm

由于气流遇到高山阻挡被迫抬升所致。

[来源：郟秀书,张其林,袁铁,等.雷电物理学[M].北京:科学出版社,2016]

3.11

闪电通道 lightning channel

雷电下行先导与地面物体的上行先导连接后建立的雷电放电通道。

[来源：杨晖等.避雷针工作原理研究[J].电力系统装备,2023(6):66-68]

3.12

下行先导 downward leader

当雷云底部电场强度达到空气电离阈值时,开始形成向下运动的离子电流(流光)。从时间的角度看像梯级一样,故称梯级先导,又称下行先导。每次向下击穿空气的平均距离约 50m,持续时间 35ms,速度 $2 \times 10^5 \text{m/s}$,电流 100-200A。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3.5]

3.13

上行先导 upward leader

受雷电下行先导端部电场的影响,避雷针等地面突出物端部感应出与下行先导电场极性相反的电荷,当其电场强度达到电晕阈值(3-5kV/m)时发生电晕并产生电晕电流(流光)。受库仑定律约束,其方向向上并向下行先导端部发展,称为上行先导。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3.6]

3.14

闪击距离 blitz distance

取下行先导顶端离地面的某一高度,在这一高度下最终的空气间隙正好达到临界击穿强度。物理上,下行先导最后的一个梯级才影响向下发展的先导和由地面向上发展的流光间的会合。因此,上下先导在空中最后连接的距离,叫做闪击距离。

[来源:杨晖等.避雷针工作原理研究[J].电力系统装备,2023(6):66-68]

3.15

首次雷击 first strike of lightning

雷电上下先导连接后的第一次回击,称为首次回击。具有电流峰值大(30kA),转移电荷多(5C),但电流陡度较小($10-20 \text{kA}/\mu\text{s}$)的特点。

[来源:拉科夫(V. A. Rakov).高焱,杨少杰译.雷电参数的工程应用[M].北京:气象出版社,2019]

3.16

继后回击 subsequent return stroke

紧接首次回击后的雷击,称为继后回击。具有1个或多个脉冲,电流峰值较小(10-15kA),转移电荷较少(1C),但电流陡度大($30-50 \text{kA}/\mu\text{s}$)的特点。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3.1]

3.17

连续电流 continuous current(CC)

闪电通道中紧接回击过程后较低幅值、运动方向不变的脉动电流叫连续电流。其幅值为几十到几百安培,持续时间为几十到几百毫秒,维持通道发光,转移大量电荷(占总放电电荷量的75%以上),产生包括热效应在内的最严重的雷击损坏。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3.1]

3.18

M分量 M-component

发生在雷电通道中并伴随着连续电流的暂态过程。

[来源:拉科夫(V. A. Rakov).高焱,杨少杰译.雷电参数的工程应用[M].北京:气象出版社,2019]

3.19

闪电通道阻抗 lightning Channel Impedance

闪电通道的阻抗。用于计算闪电效应电路模型(诺顿等效电路)的源,也用于确定闪电电流注入点的反射系数。

注:在电磁模型中,Podgorski和Landt(1987)设定闪电通道单位长度为 $0.7 \Omega/\text{m}$,而Moini(2000)则设定为 $0.065 \Omega/\text{m}$ 。

[来源:郟秀书,张其林,袁铁,等.雷电物理学[M].北京:科学出版社,2016]

3.20

雷击路径 path of lightning strikes

保护区雷电经过的路径。平坦的地方雷暴趋向于沿直线运动，锋面和热（气团）雷暴均如此；而在山区，雷暴运动路径受地形支配，产生抬升和辐合运动。

[来源：杨晖, 等. 区域防雷的理论和应用技术研究[J]. 广东气象, 2018 41(4)69-73]

3.21

风抬升运动 wind uplift motion

指地表高大物体（如山脉、高层建筑群等）与雷电运动路径呈垂直或夹角关系时，雷云底部地表风翻越高大物体时的抬升现象。

[来源：T/LYCY 4062—2024, 8.3]

3.22

风辐合运动 wind irradiation

指地表山谷风与雷云底部风场的相互作用，称为辐合运动。

[来源：T/LYCY 4062—2024, 8.3]

3.23

雷击点分布 distribution of lightning strikes

保护区内落雷点的规律。雷击点的分布与雷击路径和地面高大物体的分布形态相关。在山区，雷击点可能发生在山脊、山腰或山脚下，且呈规律变化。

[来源：T/LYCY 4062—2024, 8.3]

3.24

雷击时间间隔 lightning strike interval

两次雷电放电的时间间隔。美国观测到平均为 5 分钟，广州观测平均为 4 分 33 秒。

[来源：杨晖, 等. 区域防雷的理论和应用技术研究[J]. 广东气象, 2018 41(4)69-73]

3.25

地面风的速度 speed of ground winds

指雷电过境时地面风的速度。美国观测平原雷击大风的风速为 20-30km/h，广州观测到 5-8 级大风，地面风速在 8-20m/s 区间。

[来源：杨晖, 等. 区域防雷的理论和应用技术研究[J]. 广东气象, 2018 41(4)69-73]

3.26

直接雷击 direct strike

雷电的下行先导与地面突出物产生的上行先导相连接而发生的雷击，包括过顶雷击和侧面雷击。

[来源：T/GZLY 3—2022, 3.1]

3.27

过顶雷击 over the top of the lightning strike

雷电经过被保护物体的顶部而发生的直接雷击，简称直击雷。

[来源：T/GZLY 3—2022, 3.2]

3.28

侧面雷击 side lightning strike

雷电经过被保护物体的侧面而发生的雷击，简称侧击雷。侧面雷击一般发生在相对高度 20m 以上的地面物体。

[来源：IEC 62305-3—2010, 5.2.2]

3.29

地电位反击 ground potential strikes back

地下金属构件因雷击电磁波通过土壤传导产生的闪络或高电位现象。当其值超过设备的耐受力时，将导致设备损坏。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3. 4]

3. 30

穿透深度 penetration depth

雷电波在土壤或海水中的传播距离，定义为电场强度减少到地面(海面)电场强度的 $1/e$ 倍(37%)。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3. 2]

3. 31

风机过渡过程 wind turbine transition process

风机从静止状态转换到恒速状态或从恒速状态转换到静止状态产生过电压的过渡过程，其值与风机的功率相关。

[来源：苏柱坚, 等. 风力发电机输出电压的过渡过程分析[J]. 电力系统装备, 2024 (2) : 60-63]

3. 32

风向频率玫瑰图 rose diagram of wind frequency

根据当地风向和发生频率统计，用百分数和罗盘方向绘制的风向频率图，由于其形状像玫瑰，故称风向频率玫瑰图。一般用 8 个或 16 个罗盘方向绘制，有多年平均、年平均、月平均等。

[来源：杨晖, 等. 区域防雷的理论和应用技术研究[J]. 广东气象, 2018 41(4)69-73]

3. 33

避雷针 lightning rod

1752 年富兰克林发明，其由一段其端部为针状的导电金属材料、引下线和接地体组成。欧洲叫“Lightning Conductor”，美国叫“Lightning rod”，麦克斯韦(Maxwell)称其为引雷针，布克纽(Bouquegneau)称其为拦截器，中译名避雷针，避雷针产生的上行先导平均长度约 50m。

[来源:戈尔德(R. H. Golde)《雷电》[M](下)周诗健等译, 北京: 水电出版社, 1981]

3. 34

电晕 corona

强电场作用下地面物体尖端(避雷针是地面物体尖端的一种形式)周围空气被电离的现象。

[来源:杨晖等. 避雷针工作原理研究[J]. 电力系统装备, 2023 (6) : 66-68]

3. 35

离子云 ion cloud

地面尖端物体电晕后，与雷电下行先导端部电荷极性相同的离子受到电场力的排斥和风(平流输送)的共同作用，向下风向区域扩散形成像云一样的离子屏蔽层。

[来源: yanghui, et al. Distribution Characteristics and Shielding Effects of Ion Clouds[J]. Meteorological and Environmental Research, 2023, 14(2) 42-44, 49.]

3. 36

色散 dispersion

波导中传输不同频率的电磁波时具有不同的相速。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3. 11]

3. 37

波导 waveguide

引导电磁波能量定向传播的结构，常见的是横截面为矩形或圆形的中空金属管。双导体结构可传输横电磁模(TEM)，单导体结构可传输色散的横电模(TE)或横磁模(TM)，简称色散波导。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3. 12]

3. 38

T/GSEE

谐振腔体 harmonic cavity

波导内谐振电路的等效形式，由波导，谐振电路和分布参数组成。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3. 13]

3. 39

雷电拦截器 interceptor of lightning

在雷电下行先导端部电场作用下，产生比避雷针等地面突出物体更长的上行先导，率先吸引自然雷电放电（多脉冲放电）并衰减雷击点电流（衰减效率 $\eta \geq 75\%$ ），在下风向一定距离内雷电不再放电而起到拦截作用的装置。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3. 7]

3. 40

雷击点电流 Lightning point current

雷电对地面物体放电后，从接闪点流入大地的传导电流，也称雷电流。区别于雷电放电通道的位移电流和物体尖端的电晕电流。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3. 9]

3. 41

衰减效率 interceptor decay efficiency

雷电拦截器输出端的雷电流幅值与输入端雷电流幅值之比，用 $\eta = (1 - I_1/I_2) \times 100\%$ 计算。

注：式中： η -衰减效率； I_1 -闪电定位系统监测的雷电流峰值； I_2 -风机监测系统的雷电流峰值。

[来源:yanghui, etal. Analysis on attenuation Efficiency of Lightning Current by lightning Interceptor[J]. Meteorological and Environmental Research, 2023, 14(1) 56—59]

3. 42

多脉冲 Multi-Pulses

指雷电放电多次回击组成一组有时间间隔的脉冲串，简称多脉冲。

[来源:IEC 61643-11:2011/2 PFG]

3. 43

多脉冲电涌保护器 multi-pulse surge protective device (MSPD)

能够承受同一时序多脉冲组合波冲击的电涌保护器。

[来源:QX 10. 1—2018, 3. 1. 2]

3. 44

电涌保护器 surge protection device (SPD)

用于限制瞬态过电压和分泄电涌电流的器件。它至少含有一个非线性元件。其特点是采用单个脉冲进行冲击试验，为了区别于 MSPD，又称为单脉冲电涌保护器。

[来源:QX 10. 1—2018, 3. 1. 2]

3. 45

高能吸收器 high energy absorber (HEA)

具有吸收电源线路雷电和操作过电压等瞬态脉冲能量的设备。其交流额定电压 $> 1000V$ ，直流电压 $> 1500V$ ，用于风电机组 690V/1140V/1380V 电源线路的专用设备。

[来源:何量，等. 高空核爆与雷电电磁脉冲特征及能量吸收技术[J]. 广东气象, 2022, 44 (1) : 66-68]

3. 46

吸收效率 decay efficiency of interceptors

电涌保护器（高能吸收器）输出端的残压值与输入端雷电流幅值之比。吸收效率的数学表达式为：

$$\eta = (1 - U_p/I_1) \times 100\%$$

式中： η —吸收效率； I_1 —冲击电流峰值； U_p —电涌保护器输出端的残压值。

[来源:何量,等. 高空核爆与雷电电磁脉冲特征及能量吸收技术[J]. 广东气象, 2022, 44(1): 66-68]

3.47

区域防雷 regional lightning protection

是指针对需要防雷的特定区域,在雷电发生主要路径的上风向安装雷电拦截器(接闪),拦截直接雷击,达到在下风向的特定区域内避免或减少雷击发生的技术方法。

[来源:T/LYCY 4062—2024, 3.15]

3.48

半圆法 semicircular method

依据当地雷电活动规律,在雷电发生主要路径的上风向安装雷电拦截器,有效拦截(吸引)雷电并衰减雷击点电流,避免或减少下风向保护区域内发生直接雷击和优化电磁场环境的工程技术方法。其保护范围为1/2圆,称半圆法。

[来源:T/LYCY 4062—2024, 8.1.1]

3.49

保护范围 scope of protection

从雷电活动路径的上风向首个接闪点至下风向的直线距离内,没有超过上风向首个接闪点保护高度的区域,保护范围的表达式为:

$$A = \pi r^2 / 2$$

注:式中:A—被保护区域的面积(m^2), r —两次雷击之间的距离(m)。

[来源:T/LYCY 4062—2024, 8.1.1]

3.50

雷击风险源 lightning risk source

根据风电场可能遭受雷击的种类划分。按直击雷、侧击雷、雷电强电磁脉冲、地电位反击划分为四个风险源。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3.17]

3.51

风险等级 risk grade

按照风电场雷击风险源划分,风险等级分为0风险A级,低风险B级,中风险C级,高风险D级。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3.18]

3.52

防雷安全等级 lightning protection grade

根据风电场雷击风险等级、设备雷击频繁程度、损失程度进行划分,防雷安全等级分为A(0风险)、B(低风险)、C(中风险)、D(高风险)四级与风险等级对应。

[来源:T/GZLY 3—2022, 3.19]

4 一般要求

4.1 风电场防雷工程应进行现场勘测。

4.2 依据现场勘测资料,进行雷击风险评估和区域防雷工程设计。

4.3 风机机舱顶部安装雷电拦截器,应采用与风机叶片接闪器并行的方法。

5.4.1 雷击路径应依据 5.3 的要求确定，划分为以下八个基本类型：

- 东-西或西-东（E-W, W-E）
- 南-北或北-南（S-N, N-S）
- 东北-西南或西南-东北（EN-WS, WS-EN）
- 东南-西北或西北-东南（ES-WN, WN-ES）

5.4.2 雷击路径应依据风向频率玫瑰图的概率峰值确定，偏移量不超过 5° 。

5.4.3 雷击路径应标明角度和方向，如 $E90^\circ \text{--}W270^\circ$ ， $EN75^\circ \text{--}WS245^\circ$ ，用线条和箭头表示方向。

5.5 雷电拦截点的选择

5.5.1 一般原则

5.5.1.1 山区风电场

山区雷电运动路径与所处山脉的相互关系决定了落雷点位置，依据下述情况应选择合适位置作为雷电拦截点。

——当雷云活动路径与山脉走向相垂直时，拦截点应设在山脚处，见图 2。

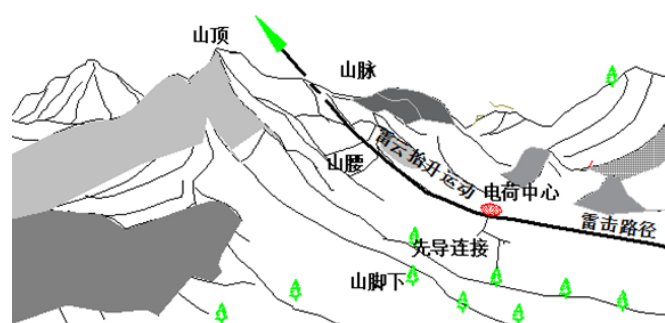


图2 雷云活动路径与山脉走向相垂直时雷击点分布

——当雷云活动路径与山脉走向呈夹角时，拦截点应设在山腰处，见图 3。



图3 雷云活动路径与山脉走向呈夹角时雷击点分布

——当雷云活动路径与山脉走向相平时，拦截点应设在山脊处，见图 4。

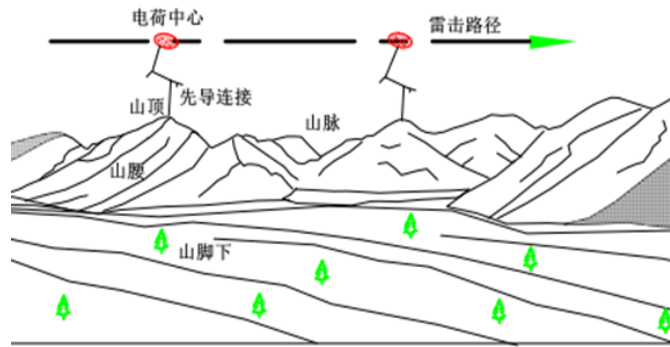


图4 雷云活动路径与山脉走向平行时雷击点分布

——山区雷电拦截点选择见表 1:

表1 雷电活动路径与山脉的相互关系

雷击路径与山脉的关系	山脉陡度	大概率雷击点	雷击树木（突出物）的概率			拦截器安装位置
			山脊	山腰	山脚	
垂直	$\geq 15\%$	山脚	0	0	大	山脚
夹角	$\geq 15\%$	山腰	0	大	0	山腰
平行	$\geq 15\%$	山脊	大	0	0	山脊

5.5.1.2 平原风电场

平原风电场包括草原、沙漠。雷电运动路径与平原风电场风机的相互关系决定了落雷点位置，依据下述情况应选择合适位置作为雷电拦截点。

——平原区域的雷云运动方向可视为水平线性运动：

——当雷电经过风电场上空时，雷击点主要发生在风电场迎风向首行（列）风机附近，拦截点应设在迎风向首行（列）风机位置，见图 5。

——当雷电经过风电场侧面时，雷击点主要发生在风电场四周外围首行（列）风机附近，拦截点应设在四周首行（列）风机位置。

——平原风电场离山脉 $< 15\text{km}$ ，雷云向山脉方向运动将产生抬升作用，雷击点将发生在抬升过程曲率半径最大处，拦截点的设置可参照历史雷击点的分布（机械性损坏的风机位置）和雷击风险评估结果，认真分析风电场所处的地理环境后选择拦截点。

——拦截点的设置应实现电晕离子屏蔽层对平原风电场保护区域全覆盖，保护半径 $r \leq 2\text{km}$ 。

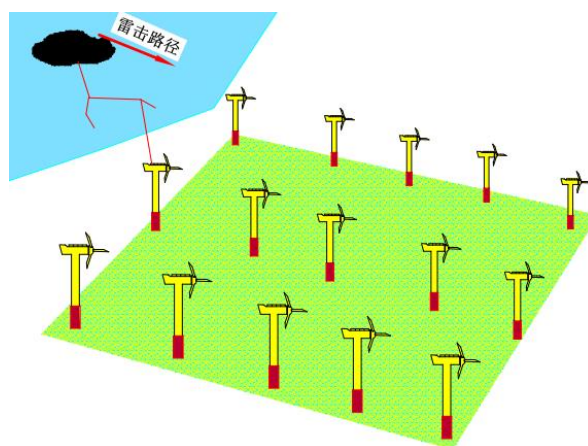


图5 雷云经过风电场上空时雷击点分布

5.5.1.3 海上风电场

雷电运动路径与海上风电场风机的相互关系决定了落雷点位置，依据下述情况应选择合适位置作为雷电拦截点。

- 离岸 $> 50\text{km}$ 的远海风电场和离岸 $> 15\text{km}$ 的近海风电场，雷云运动方向可视为水平线性运动。
 - 当雷电经过风电场上空时，雷击点主要发生在风电场迎风向首行（列）的风机附近，拦截点应设在迎风向首行（列）风机位置。
 - 当雷电经过风电场侧面时，雷击点主要发生在风电场四周外围首行（列）的风机附近，拦截点应设在四周首行（列）风机位置，见图 6。
- 近海风电场离岸 $< 15\text{km}$ ，雷云朝陆地方向运动将产生抬升现象，雷击点将发生在抬升过程中曲率半径最大处。拦截点的设置应参照历史雷击点的分布（机械性损坏的风机位置），认真分析风电场所处的地理环境后选择拦截点。
- 拦截点的设置应实现电晕离子屏蔽层对海上风电场保护区域全覆盖，保护半径 $r \leq 2\text{km}$ 。

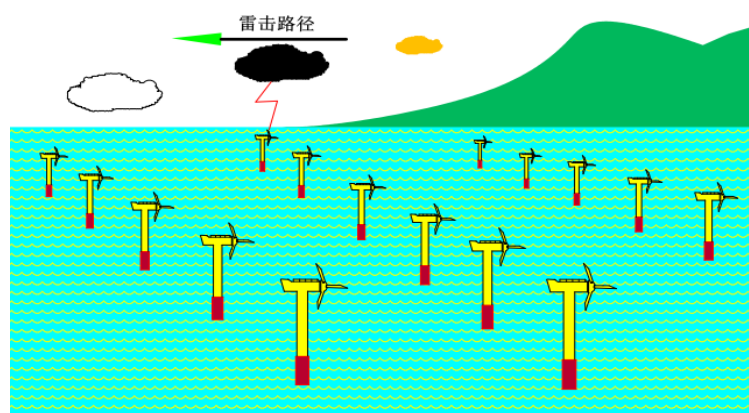


图6 雷云从风电场侧面经过时雷击点分布

5.5.2 特殊情况

- 由山脉等地形因素导致地表风产生抬升或辐合处应作为拦截点；
- 历史雷击点位置应作为拦截点；
- 相对海拔最高处作为雷电拦截点；
- 升压站等建筑物应利用原有避雷针杆塔或建筑物顶部安装雷电拦截器，避雷针杆塔或建筑物顶部原有的避雷针（包括短针）应予拆除且对断面采取圆角处理。

5.6 风电场基本数据

5.6.1 风机位置

- 风机坐标（经纬度、等高线、高程）；分类（按本规范 5.2 条）；占地面积、四置环境；
- 风机数量、型号、功率；
- 相邻风机距离；
- 平原风电场离山脉边缘距离、海上风电场离岸距离。

5.6.2 地理陡度

依据 5.6.1 的数据，陆地风电场需计算风电场地理平均陡度。
地理平均陡度用公式（1）计算。示例见图 5。

$$G = h_0/X \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

式中： G -用%表示的陡度；

h_0 -高程差（m）；

X -水平距离（m）。

如 $G=5\%$ ，表示每百米升高 5m。

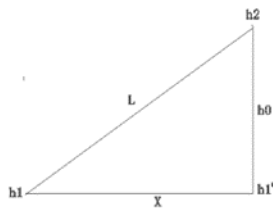


图7 地理陡度

5.6.3 各电气、电子系统现状

5.6.3.1 风机发电系统：

- 风机：类型、功率、驱动类型、变频器输出额定值、塔筒、叶片几何尺寸、接闪点及引下线安装方式；
- 机舱顶部：安全围栏、气象桅杆几何尺寸，风向风速仪间距；
- 轮毂、机舱：控制柜断路器的规格、参数，避雷器的规格、参数，轮毂中 EPD 保护避雷器的规格、参数；
- 塔基控制柜：断路器的规格、参数，避雷器的规格、参数；
- PE 线连接：轮毂、机舱、塔筒、塔基、塔底（负一层）各节点连接方式；
- 塔筒内电缆布置：690V 电缆的低频辐射强度、信号线与 690V 电缆的间距；
- 接地体：风机接地体电阻测量值。

5.6.3.2 箱式变压器：

——690V 实际测量值、箱变高压侧线路避雷器型号、参数，低压侧零线保护形式、箱变接地电阻测量值。

5.6.3.3 集电线路：

- 电压等级、架空或直埋、环境、走向；
- 避雷线形式、线路避雷器规格、参数，杆塔接地电阻值；
- 每条集电线路的高程、长度、回路数量、杆塔数。

5.6.3.4 升压站：

- 建筑物顶部避雷针、带；独立避雷针数量、高度；
- 主变容量、中性点接地方式；
- 主变两侧线路避雷器规格、参数；
- 主变高压侧断路器规格型号、参数、整定值，低压侧断路器规格型号、参数、整定值；
- 线路录波器的设置（录波、测距、开关量、故障报告）；
- 进入建筑物内的各类金属管线，电力、信息、防雷等的接地形式和电阻值。
- 升压站到电网变电站的距离。

5.6.3.5 光纤环网通信系统：

- 光缆类型、规格、参数，直埋光纤缆井设置（如果有），架空光纤形式；
- 光纤接线盒、光缆端口绝缘处理、接地方法。

5.6.3.6 高压输电线：

- 电压等级（110kV/220kV）架设形式、长度、环境、走向。

6 雷击风险评估

6.1 风电场雷击风险源

- S1:直击雷（过顶雷击）：雷击风机叶片端部，集电线路，升压站；
- S2:侧击雷（侧面雷击、侧下雷击）：雷击风机叶片端部以下地面以上设备部分，集电线路，升压站；
- S3:雷电电磁脉冲：通过传导（金属介质、土壤）和辐射方式影响场内电气电子设备；
- S4:邻近雷击：雷击风机、集电线路，升压站附近物体或地面；
- S5:地电位反击：雷击引起地下金属物体发生闪络放电，其产生的电磁脉冲通过接地系统传导到电缆、电气电子设备的现象。

6.2 风险源与风险因子

雷击风险源按雷击的不同形式和性质可分为：直击雷 S1，侧击雷 S2，雷电电磁脉冲 S3，邻近雷击 S4，地电位反击 S5，风险因子与风险源的关系见表 2：

表2 雷击风险因子与风险源的关系

序号	雷击形式、性质	风险源	风险因子
1	直击雷	S1	R1
2	侧击雷	S2	
3	雷电电磁脉冲	S3	R2
4	邻近雷击	S4	R3
5	地电位反击	S5	

6.3 风险因子赋值

6.3.1 直击雷风险因子 R1 (S1、S2)

雷击风电场与风电场所在的地理位置、四周地面突出物的高度有关。当该风电场处在雷击路径并为雷击点附近，将大概率受到雷击。受到雷击后，雷电流的效应将导致风机等设备的物理损坏或产生强电磁脉冲损坏设备。把此现象定义为风险因子 R1，需要根据下列现状对 R1 赋值。

a) R1=0, 0 风险。

- 风机：机舱顶部安装全方位雷电拦截器，机舱所有金属物体电气连通并与机舱内接地专用板可靠连接；风机叶片接闪器引下线经碳刷与机舱内接地专用板可靠连接，机舱内接地专用板用多股铜缆与塔筒接地体可靠连接，整个机舱不存在放电间隙。
- 集电线路：全场采用埋地电缆并符合电力埋地电缆的有关规定；全程架空线路塔杆已安装全方位雷电拦截器有效保护。
- 光纤环网通信系统：全场采用埋地光缆，光缆连接处（光缆井）的两端铠装金属和碳素钢丝（加强筋）分别接地，光缆端口（进出风机处）的铠装金属和碳素钢丝与光纤有效绝缘并可靠接地或安装光缆端口陡度抑制器。
- 升压站：站区域内采用原有避雷针杆塔安装两支全方位雷电拦截器（对角位置），站内建筑物顶部安装有避雷带（避雷带四角没有避雷短针），主变高压侧断路器采用 GIS 且继电保护已满足雷击线路的影响，主变低压侧断路器不受雷击高压侧线路雷击而误动作。
- 接地系统：风机具有良好的接地系统，风机、箱变接地体工频电阻年平均 $\leq 10\Omega$ 。升压站接地体工频电阻 $\leq 4\Omega$ 。

b) R1=1, 低风险。

- 风机：机舱顶部安装全方位雷电拦截器，机舱所有金属物体电气连通并与机舱内接地专用板可靠连接；风机叶片接闪器经碳刷与机舱内接地专用板可靠连接，机舱内接地专用板用多股铜缆与塔筒接地体可靠连接，整个机舱不存在放电间隙。
- 集电线路：风机箱变出线采用埋地电缆，经架空线路送到升压站，架空线路杆塔安装全方位雷电拦截器有效保护。
- 光纤环网通信系统：全场采用架空避雷线敷设光缆，光缆连接处（接线盒）的两端铠装金属和碳素钢丝（加强筋）分别接地，光缆端口（进出风机处）的铠装金属和碳素钢丝与光纤有效绝缘并可靠接地。
- 升压站：站区域内采用原有避雷针杆塔安装两支全方位雷电拦截器（对角位置），站内建筑物顶部安装有避雷带、四角安装有避雷短针；主变高压侧断路器采用 GIS 且继电保护已满足雷击线路的影响，主变低压侧断路器不受雷击高压侧线路而误动作。
- 接地系统：风机具有良好的接地系统，风机、箱变接地体工频电阻年平均 $\leq 10\Omega$ 。升压站接地体工频电阻 $\leq 4\Omega$ 。

c) R1=2, 中风险。

- 风机：机舱顶部安装全方位雷电拦截器，机舱所有金属物体电气连通并与机舱内接地专用板可靠连接；风机叶片接闪器经碳刷与机舱内接地专用板可靠连接，机舱内接地专用板用多股铜缆与塔筒接地体可靠连接，整个机舱不存在放电间隙。
- 集电线路：全场采用架空线路送电到升压站，架空线路未安装全方位雷电拦截器。
- 光纤环网通信系统：全场采用架空避雷线敷设光缆，光缆连接处（接线盒）的两端铠装金属和碳素钢丝（加强筋）未分别接地或接地方法不当，光缆端口（进出风机处）的铠装金属和碳素钢丝与光缆没有有效绝缘。

- 升压站：站区域内安装两支全方位雷电拦截器（对角位置），站内建筑物顶部安装有避雷带、四角安装有避雷短针；主变高压侧断路器采用 GIS 且继电保护不满足雷击线路的影响，主变低压侧断路器受雷击高压侧线路雷击而误动作。
- 接地系统：风机接地系统存在较大阻抗，风机、箱变接地体工频电阻年平均值 $>10\Omega$ 。升压站接地体工频电阻 $\leq 4\Omega$ 。

注：只在架空集电线路安装全方位雷电拦截器的风险因子值 $R1=2$ 。

d) $R1=3$ ，高风险。

- 风机：采用风机叶片接闪，叶片接闪器引下线与轮毂铜环之间接触不良或松脱，机舱顶部气象桅杆上采用避雷针保护。机舱所有金属物体等电位连接，并与机舱内接地专用板可靠连接；风机叶片接闪器经碳刷与机舱内接地专用板可靠连接，机舱内接地专用板用多股铜缆与塔筒接地体可靠连接；轮毂内部污染影响绝缘性能，齿轮箱漏油，机舱存在放电间隙。
- 集电线路：全场采用架空线路送电到升压站，架空线路杆塔存在引雷尖端物体。
- 光纤环网通信系统：全场采用架空集电线敷设光缆，光缆连接处（接线盒）的两端铠装金属和碳素钢丝（加强筋）未分别接地，光缆端口（进出风机处）的铠装金属和碳素钢丝与光缆没有有效绝缘。
- 升压站：站区域内采用两支或多支避雷针保护，站内建筑物顶部安装有避雷带、四角安装有避雷短针；主变高压侧断路器采用 GIS 但继电保护不满足雷击线路对低压侧断路器的影响，主变低压侧断路器受高压侧线路雷击而频繁误动作。
- 接地系统：风机接地系统存在较大阻抗，风机、箱变接地体工频电阻年平均值 $>10\Omega$ 。升压站接地体工频电阻 $\leq 4\Omega$ 。

6.3.2 雷电电磁脉冲风险因子 $R2$ ($S3$)

雷击风电场的风机、集电线路、升压站及附近地面物体及雷击高压输电线路时，将在雷击点附近空间和雷电流经过的路径周围产生强烈的电磁场。当风电场设备处在雷击强电磁场环境时，将产生网络放电、线路过电压而损坏设备。把此现象定义为风险因子 $R2$ ，为预防传导到风机电源系统的过电压，需要根据下列现状对 $R2$ 赋值。

a) $R2=0$ ，0 风险。

- 风机：在机舱控制柜（电源开关处）安装与发电机额定电压一致的三相雷电多脉冲高能吸收器（其恒定转速时的电压值随风机功率大小而不同），吸收雷击和风机启动-恒速过渡过程大陡度过电压能量，其多脉冲冲击通流能力 $I_n \geq 40kA$ ；在变频器输出端（电源开关处）安装与其额定电压一致的三相雷电多脉冲高能吸收器（如 690V 或 1140V），其多脉冲冲击通流能力 $I_n \geq 20kA$ 。在塔筒控制柜 380V 开关处安装三相多脉冲电涌保护器（T2），其多脉冲冲击通流能力 $I_n \geq 20kA$ 。在塔筒控制柜底部安装 PE-N 单相多脉冲电涌保护器（T2），其多脉冲冲击通流能力 $I_n \geq 20kA$ 。
- 箱变：在箱变低压侧安装与变频器输出额定电压一致的三相雷电高能吸收器，其多脉冲冲击通流能力 $I_n \geq 20kA$ 。在箱变高压侧安装的线路避雷器，其通流能力 $I_n \geq 10kA$ 。
- 集电线路：架空线路三相线路避雷器的通流能力 $I_n \geq 10kA$ ，杆塔工频接地电阻 $\leq 10\Omega$ 。
- 光纤环网通信系统：光缆端口（进出风机处）的铠装金属和碳素钢丝与光缆有效绝缘和良好接地，或安装光缆陡度抑制器，其通流能力 $I_n \geq 20kA$ 。
- 升压站：主变高低压侧安装相应电压等级的线路避雷器，其通流能力 $I_n \geq 10kA$ 。
- 接地系统：风机具有良好的接地系统，风机、箱变接地体工频电阻年平均值 $\leq 10\Omega$ 。升压站接地体工频电阻 $\leq 4\Omega$ 。

b) R2=1, 低风险。

- 风机：在机舱控制柜（电源开关处）安装与发电机额定电压一致的三相雷电多脉冲高能吸收器（其恒定转速时的电压值随风机功率大小而不同），吸收雷击和风机启动-恒速过渡过程大陡度过电压能量，其多脉冲冲击通流能力 $I_n \geq 40\text{kA}$ ；在变频器输出端（电源开关处）安装与其额定电压一致的三相雷电多脉冲高能吸收器（如 690V 或 1140V），其多脉冲冲击通流能力 $I_n \geq 20\text{kA}$ 。在塔筒控制柜 380V 开关处安装三相多脉冲电涌保护器（T2），其多脉冲冲击通流能力 $I_n \geq 20\text{kA}$ 。在塔筒控制柜底部安装 PE-N 单相多脉冲电涌保护器（T2），其多脉冲冲击通流能力 $I_n \geq 20\text{kA}$ 。
- 箱变：在箱变低压侧安装与变频器输出额定电压一致的三相雷电高能吸收器，其多脉冲冲击通流能力 $I_n \geq 20\text{kA}$ 。在箱变高压侧安装的线路避雷器，其通流能力 $I_n \geq 10\text{kA}$ 。
- 集电线路：架空线路三相避雷器的通流能力 $I_n \geq 10\text{kA}$ ，杆塔工频接地电阻 $\leq 10\Omega$ 。
- 光纤环网通信系统：光缆端口（进出风机处）的铠装金属和碳素钢丝与光缆有效绝缘和良好接地，或安装光缆陡度抑制器，其通流能力 $I_n \geq 20\text{kA}$ 。
- 升压站：主变高低压侧安装相应等级的线路避雷器，其通流能力 $I_n \geq 10\text{kA}$ 。
- 接地系统：风机具有良好的接地系统，风机、箱变接地体部分工频电阻年平均值 $10\Omega \leq R \leq 30\Omega$ 。升压站接地体工频电阻 $\leq 4\Omega$ 。

c) R2=2, 中风险。

- 风机：在机舱控制柜（电源开关处）安装与发电机输出额定电压一致的三相单脉冲电涌保护器（不能吸收雷击和风机启动-恒速过渡过程大陡度过电压能量），在变频器输出端（电源开关处）安装与其额定电压一致的三相单脉冲电涌保护器（如 690V 或 1140V）；在塔筒控制柜 380V 开关处安装三相单脉冲电涌保护器（T2）：出现过 SPD 脱离线路现象（故障指示由绿色翻转为红色）。
- 箱变：低压侧安装三相单脉冲电涌保护器（T1 或 T2），高压侧安装的线路避雷器其通流能力 $I_n \leq 5\text{kA}$ ，出现过雷击导致线路避雷器击穿损坏现象。
- 集电线路：架空线路三相避雷器的通流能力 $I_n \leq 5\text{kA}$ ，曾经出现过脱扣、爆裂现象；部分杆塔工频接地电阻 $\geq 10\Omega$ 。
- 光纤环网通信系统：光缆端口（进出风机处）的铠装金属和碳素钢丝与光缆没有有效绝缘和接地，光缆端口曾经出现过雷击痕迹。
- 升压站：主变高低压侧安装相应等级的线路避雷器，其通流能力 $I_n \leq 10\text{kA}$ 。雷击主变低压侧线路出现低压侧断路器动作（跳闸）现象。
- 接地系统：风机的接地系统存在较大阻抗，风机、箱变接地体部分工频电阻年平均值 $10\Omega < R < 30\Omega$ ；升压站接地体工频电阻 $\leq 4\Omega$ 。

d) R2=3, 高风险。

- 风机：在机舱控制柜（电源开关处）安装与发电机输出额定电压一致的三相单脉冲电涌保护器，在变频器输出端（电源开关处）安装与其额定电压一致的三相单脉冲电涌保护器（如 690V 或 1140V）；在塔筒控制柜 380V 开关处安装三相单脉冲电涌保护器（T2）：经常出现脱离线路现象（故障指示由绿色翻转为红色）。
- 箱变：低压侧安装三相开关型单脉冲电涌保护器（T1），高压侧安装的线路避雷器其通流能力 $I_n \leq 5\text{kA}$ ，雷击导致线路避雷器和箱变绝缘击穿损坏。
- 集电线路：架空线路三相避雷器的通流能力 $I_n \leq 5\text{kA}$ ，曾经出现过脱扣、爆裂现象；部分杆塔工频接地电阻 $\geq 10\Omega$ 。
- 光纤环网通信系统：光缆端口（进出风机处）的铠装金属和碳素钢丝与光缆没有有效绝缘

和接地，光缆端口出现过雷击痕迹、光纤熔断现象。

- 升压站：主变高低压侧安装相应等级的线路避雷器，其通流能力 $I_n \leq 10\text{kA}$ ，雷击主变高低压侧线路均出现低压侧断路器动作（跳闸）现象
- 接地系统：风机的接地系统存在较大阻抗，风机、箱变接地体部分工频电阻年平均值为 $10\Omega < R < 30\Omega$ ；升压站接地体工频电阻 $\leq 4\Omega$ 。

6.3.3 邻近雷击和地电位反击风险因子 R3（S4、S5）

邻近雷击是指雷击发生在风电场范围外部附近，其对风电场内部设备的损害，主要有通过空间的辐射和通过土壤的传导两个途径，其空间辐射的电磁场产生的影响可能导致集电线路过电压而及地点保护动作，其通过土壤传导的雷电波则可能对风电场内地下土壤中的金属产生电磁脉冲（电位抬升）而发生闪络放电现象（如埋地金属光缆）。把此现象定义为风险因子 R3，需要根据下列现状对 R3 赋值。

- a) R3=0, 0 风险。
 - 风机：风机叶片接闪点、引下线、轮毂连接电、碳刷、机舱接地板、专用 PE 接地线、风机接地环、塔基接地体任一连接节点不存在放电间隙；在塔基负一层，风机接地环与塔基接地体之间连接的过渡直流电阻应 $\leq 2.5\text{m}\Omega$ ，电感 $\leq 0.025\ \mu\text{H}$ ；风机内所有与接地系统连接的金属导体实现全等电位连接，没有放电间隙，其连接材料规格应符合 GB 50057—2010《建筑物防雷设计规范》的要求；
 - 箱变：设置在风机外的箱变与风机共用接地体，通过电缆井与塔基接地体连接时拐弯 $> 90^\circ$ ；用于保护箱变的金属围栏，应在对角不少于 2 处与箱变接地体可靠连接。
 - 集电线路：埋地金属光缆接头处连接的方法满足最大故障电流容量，没有发生雷击爆裂现象。
 - 光纤环网通信系统：光缆连接处（光缆井）的两端铠装金属和碳素钢丝（加强筋）分别接地，光缆端口（进出风机处）的铠装金属和碳素钢丝与光缆有效绝缘并可可靠接地。
 - 升压站：建筑物接地、独立避雷杆塔等采用全等电位连接措施。
- b) R3=1, 低风险。
 - 风机：风机叶片接闪点、引下线、轮毂连接电、碳刷、机舱接地板、专用 PE 接地线、风机接地环、塔基接地体任一连接节点不存在放电间隙；在塔基负一层，风机接地环与塔基接地体之间连接的过渡直流电阻应 $\leq 2.5\text{m}\Omega$ ，电感 $\leq 0.025\ \mu\text{H}$ ；风机内所有与接地系统连接的金属导体实现全等电位连接，没有放电间隙，其连接材料规格应符合 GB 50057—2010《建筑物防雷设计规范》的要求；
 - 箱变：设置在风机外的箱变与风机共用接地体，通过电缆井与塔基接地体连接时拐弯 $> 90^\circ$ ；用于保护箱变的金属围栏，没有在对角不少于 2 处与箱变接地体可靠连接。
 - 集电线路：埋地金属光缆接头处采用机械压接的方法，没有发生雷击爆裂现象。
 - 光纤环网通信系统：光缆连接处（光缆井）的两端铠装金属和碳素钢丝（加强筋）分别接地，光缆端口（进出风机处）的铠装金属和碳素钢丝与光纤有效绝缘并可可靠接地。
 - 升压站：建筑物接地、独立避雷杆塔等没有采用全等电位连接措施。
- c) R3=2, 中风险。
 - 风机：风机叶片接闪点、引下线、轮毂连接电、碳刷、机舱接地板、专用 PE 接地线、风机接地环、塔基接地体任一连接节点存在放电间隙；在塔基负一层，风机接地环与塔基接地体之间连接的方式不当，过渡直流电阻远大于 $2.5\text{m}\Omega$ ；风机内所有与接地系统连接的金属导体未实现全等电位连接，存在放电间隙，其连接材料规格不符合 GB 50057—2010《建筑物防雷设计规范》的要求；

- 箱变：设置在风机外的箱变与风机共用接地体，通过电缆井与塔基接地体连接时拐弯 $< 90^\circ$ ；用于保护箱变的金属围栏，没有与箱变接地体可靠连接。
- 集电线路：埋地金属光缆接头处采用机械压接的方法，发生过雷击爆裂现象；杆塔线路避雷器偶有爆裂。
- 光纤环网通信系统：光缆连接处（光缆井）的两端铠装金属和碳素钢丝（加强筋）未接地，光缆端口（进出风机处）的铠装金属和碳素钢丝与光缆没有有效绝缘并可靠接地，光缆端口有明显的闪络痕迹。
- 升压站：建筑物接地、独立避雷杆塔等没有采用全等电位连接措施，偶尔出现主变低压侧断路器误动作（跳闸）现象。

d) R3=3，高风险。

- 风机：风机叶片接闪点、引下线、轮毂连接电、碳刷、机舱接地板、专用 PE 接地线、风机接地环、塔基接地体任一连接节点存在放电间隙；在塔基负一层，风机接地环与塔基接地体之间连接的方式不当，过渡直流电阻远大于 $2.5\text{m}\Omega$ ；风机内所有与接地系统连接的金属导体未实现全等电位连接，存在放电间隙，其连接材料规格不符合 GB 50057—2010《建筑物防雷设计规范》的要求；
- 箱变：设置在风机外的箱变与风机共用接地体，通过电缆井与塔基接地体连接时拐弯 $< 90^\circ$ ；用于保护箱变的金属围栏，没有与箱变接地体可靠连接。
- 集电线路：埋地金属光缆接头处采用机械压接的方法，频繁发生雷击爆裂现象，杆塔线路避雷器经常爆裂。
- 光纤环网通信系统：光缆连接处（光缆井）的两端铠装金属和碳素钢丝（加强筋）未接地，光缆端口（进出风机处）的铠装金属和碳素钢丝与光缆没有有效绝缘并可靠接地，发生过光纤熔断现象。
- 升压站：建筑物接地、独立避雷杆塔等没有采用全等电位连接措施，经常出现主变低压侧断路器误动作（跳闸）现象。

6.4 风险等级划分

把风电场的雷击风险划分为四个等级：分别为零风险 A，低风险 B，中风险 C，高风险 D，风险等级见表 3：

表3 风险等级划分

雷击源 S	雷击风险等级			
	A	B	C	D
直击雷 S1	R1=0	R1=1	R1=2	R1=3
侧击雷 S2				
电磁脉冲 S3	R2=0	R2=1	R2=2	R2=3
邻近雷击 S4	R3=0	R3=1	R3=2	R3=3
地电位反击 S5				

6.5 风险等级划分的原则及使用要求

6.5.1 当不满足 6.4 表 3 等级划分条件时，按风险因子最大值划分等级。如在 A 级中，只要有一个因子值为 1，即划为 B 级，如有一个因子值为 3，即划为 D 级，其逻辑关系见图 6。

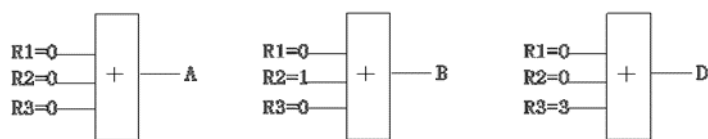


图8 风险因子最大值划分等级

6.5.2 已建风电场应依据评估结果进行整改，经整改后达到相应等级的，可调整到相应等级。新建风电场可依据风险评估结果，按 A 级 0 风险安排设备采购和建设。

6.5.3 风电场防雷安全等级采用与风险等级相同的指标，即安全 A 级、B 级、C 级、D 级。

7 直接雷击防护设计

设计单位应依据海陆风电场的分类和雷击风险等级等数据进行设计。

7.1 保护范围

7.1.1 单支全方位雷电拦截器的保护范围

从雷电活动路径的上风向首个拦截点至下风向的直线距离内，没有超过上风向首个拦截点保护高度的区域按公式（2）计算，此方法又叫半圆法，见图 9。

$$A = \frac{\pi r^2}{2} (m^2) \dots\dots\dots (2)$$

式中：A—被保护区域的面积（m²）；

r—两次雷击之间的距离，即半圆法的保护半径（m）。

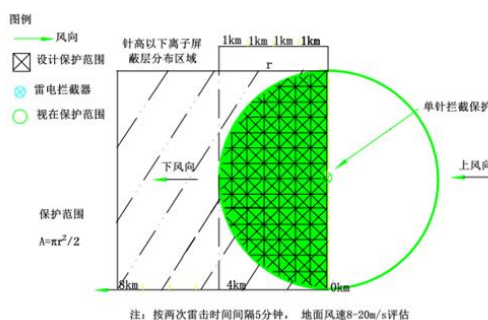


图9 单支全方位雷电拦截器的保护范围

7.1.2 四支全方位雷电拦截器的保护范围

依照 7.1.1 保护范围的定义，四支全方位雷电拦截器的保护范围按公式（3）计算，示例见图 10。

$$A = L \times W (m^2) \dots\dots\dots (3)$$

式中：A—保护区域的面积（m²）；

L—南北两支拦截器之间的直线距离（m）；

特殊条件下保护半径 r 调整例子见图 11。

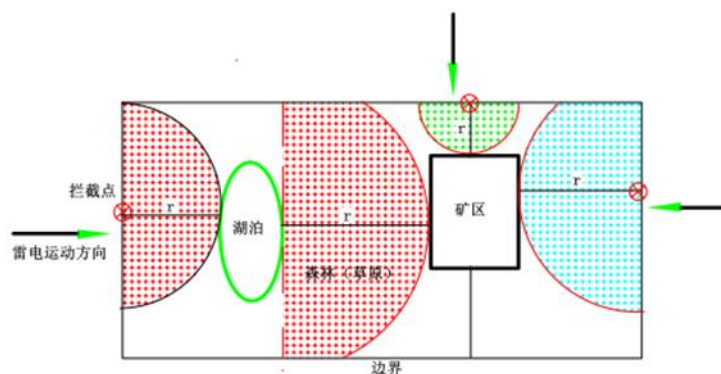


图11 特殊条件下保护半径 r 的调整

7.4 多个雷击路径时保护半径 r 的确定

若保护区域内存在多个雷击路径，应依据不同路径按照公式（2）分别进行保护区域的计算，并按照 7.3 调整保护半径 r 的值。

7.5 初步设计图纸

- 区域防雷设计说明（包括任务来源、地理环境、风电场实况、雷击路径、设计参数、保护范围等）。
- 区域雷电拦截点选择，见图 12。

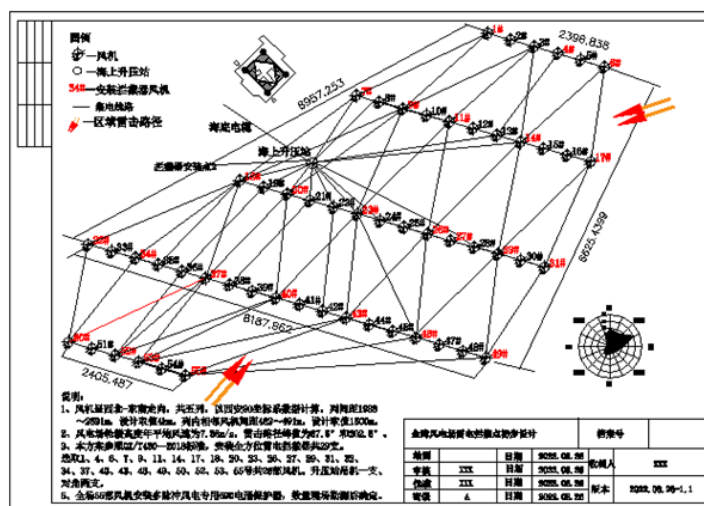


图12 风电场雷电拦截点选择

主变高低压侧线路避雷器的 I_n 应 $\geq 10\text{kA}$, 其技术参数应符合 GB/T 28547-2023 《交流金属氧化物避雷器选择和使用导则》。

8.4 光缆端口

当发生过雷击熔断光纤芯线, 可加装光缆端口专用电涌保护器。

9 自然雷电监测系统

9.1 风电场区域的雷电拦截效果应进行验证, 自然雷电多脉冲智慧监测预警系统拓扑结构见图 14。

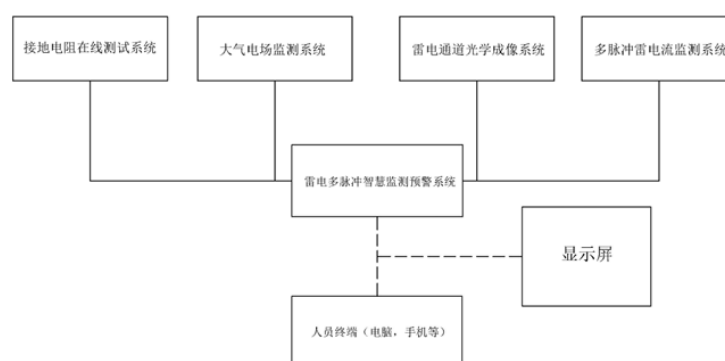


图14 自然雷电多脉冲智慧监测预警系统拓扑结构图

9.2 在不具备供电和通信条件的位置, 可安装用于统计雷电拦截器接闪次数的全寿命期雷击计数器, 其应是无源或自备电源, 并具有防水、防潮的措施。

9.3 在具备供电和通信（包括卫星短报文）的条件下, 应安装自然雷电多脉冲智慧监测预警系统。该系统应具有监测发生时间、雷击次数、雷电流幅度、陡度、极性、脉冲个数六个参数和温度、湿度等, 具有统计功能和远程监测终端, 可在电脑或手机查看数据并具有预警功能。

9.4 对具有重要科研价值的风电场, 可采用雷击计数器、自然雷电多脉冲智慧监测预警系统结合三维闪电定位系统对拦截效果进行统计分析。闪电定位系统应能提供该区域的年雷暴日, 雷击次数, 最大、最小、平均雷电流, 雷电极性和典型的波形参数。

9.5 对雷电拦截装置的雷电流衰减计算方法, 参照附录 B。

10 雷电拦截器现场安装及运维要求

10.1 现场安装

10.1.1 安装相对高度

安装在风机机舱顶部气象桅杆或独立金属支撑杆上, 宜比气象桅杆上的风向风速仪高 20-50cm; 安装在集电线路杆塔（支撑杆等）、升压站、陆上集控中心等建构物顶部, 宜比避雷线（带）高 50-80cm。

10.1.2 工频接地电阻值

接地电阻值 $\leq 10\Omega$ 。当安装位置所在建构物接地系统符合 GB50057-2010 《建筑物防雷设计规范》要求时, 直接利用其接地系统良好接地。

10.1.3 空间方位角度

拦截某一雷击路径的雷电所设置的一个或多个拦截点，在上风向第一个拦截点安装的雷电拦截器，应有一支水平短针与雷云移动路径方向相反；当雷电拦截点为行、列式形态时，相邻拦截器的水平短针之间宜保持 45° 角布置。安装时，应严格按照设计的空间方位角度进行现场调试。

10.1.4 抗风能力

抗风能力应 $\geq 70\text{m/s}$ ，铁塔（支撑杆等）金属支撑物安装应符合 GB50017-2017《钢结构设计规范》、GB50135-2019《高耸结构设计标准》要求。

10.1.5 道路运输

海陆风电场防雷工程设备在道路（海上）运输时，应采取有效措施，确保设备、器材的安全。

10.2 运维

10.2.1 项目内容

- a) 拦截器的安装牢靠程度；
- b) 工作状态（工作状态需用专用仪表测试）；
- c) 多脉冲电涌保护器（高能吸收器）工作状态；
- d) 自然雷电多脉冲智慧监测预警系统工作状态；
- e) 接地系统参数。

注：具体检测项目和合格评定指标见附录D。

10.2.2 运维周期

区域防雷装置的运维周期一年一次，宜在风电场所在地非雷暴高发期进行。

10.2.3 寿命周期

- a) 雷电拦截器的寿命周期为五年。
- b) 在污染、腐蚀环境下，由于拦截器色散波导谐振腔体内存在电场，吸附污染物导致表面呈灰黑色，对其工作性能没有影响。

10.3 施工安全要求

- a) 现场勘测和设备安装人员进入风电场，应遵守风电场的安全规定。
- b) 在风机机舱顶部、铁塔、高杆等场所作业人员应取得高处作业证和电工证，操作人员必须佩戴安全带、安全帽、防滑鞋。
- c) 所有安装设备和工具应有预防高处坠落措施。
- d) 雷电拦截器安装现场不应少于两人，其中一人在地面负责施工安全监督，并负责用无人机对安装过程监测和录像。

附录 A (规范性)

雷电拦截器的工作原理及技术参数

A.1 雷电拦截器的工作原理

全方位多脉冲雷电拦截器采用色散波导谐振腔体结构，具有自动识别雷电的空间位置，全方位拦截直接雷击并衰减雷击点电流，适应雷电多脉冲放电的装置。根据雷电流的双指数波特点，利用傅里叶变换和巴塞瓦尔等式，可得到雷电波的振幅频谱和能量频谱。按照雷电波的振幅和能量频谱分布规律，色散波导谐振腔体采用了振幅频谱选择/阻抗变换，波阻抗电压倍增技术、分布参数控制技术，使得全方位多脉冲雷电拦截器具有良好的频谱选择和波阻抗自适应能力。波导谐振腔体把通带 f_0 以外频谱分量（包括连续电流，其占放电总电荷量的 75%）的雷电流按波动方程反射回输入端，并把能量转化为热能，从而使输出的雷电流频谱限定在通带 f_0 以内，输出电流仅为输入电流的 75% 左右（仅连续电流），具有显著减小雷击点电流的作用。

A.2 设计标准

- GB/T 169271-2011 高电压试验技术第 1 部分：一般定义及试验要求
- GB/T 33588.1-2017 雷电防护系统部件（LPSC）第 1 部分：连接件的要求
- NF C17-102: 2011 Protection against lightning: Early streamer emission lightning protection systems

A.3 雷电拦截核心技术体系

A.3.1 雷电拦截器（I 型）的技术参数

- 结构：色散波导谐振腔体单针终端
- 功能：拦截过顶雷击
- 技术参数：（国家第三方试验报告参数）
 - $\Delta t \geq 45 \mu s$ （1200kV 条件下与标准避雷针比对试验）
 - $P=100\%$ （直击雷接闪概率）
 - $I_a \geq 75\%$ （衰减雷击点电流）
 - $r < 6.5m$ （以 30kA 全球平均计算，雷击磁场强度 2.4Gs 半径）
 - $A = \pi r^2 / 2$ （下风向保护范围， $r=2 \sim 8km$ ）
- 特点：使用限高 20m。仅预防过顶雷击（城镇建构物 $h \leq 20m$ ），不能应用在发生侧面雷击的场合（ $h \geq 20m$ ，高山等）。

A.3.2 全方位雷电拦截器（II 型）的技术参数

- 结构：色散波导谐振腔体五针终端
- 功能：拦截过顶雷击和侧面雷击
- 技术参数：
 - $\Delta t \geq 45 \mu s$ （1200kV 条件下与避雷针比对试验）
 - $P=100\%$ （直击雷接闪概率/试验报告参数）
 - $P \geq 90\%$ （侧击雷接闪概率/试验报告参数）

T/GSEE

- $I_a \geq 75\%$ (衰减雷击点电流, 理论计算值; 个例监测衰减效率 $\eta \geq 90\%$)
- $r < 6.5\text{m}$ (以 30kA 全球平均计算, 雷击磁场强度 2.4Gs 半径)
- $A = \pi r^2 / 2$ (下风向保护范围, $r = 2 \sim 8\text{km}$)
- 特点: 使用无需限高, 可预防过顶雷击和侧面雷击 (包括侧下雷击)。

A.3.3 雷电抑制器 (III型) 的技术参数

- 结构: 色散波导谐振腔体球状终端
- 功能: 抑制过顶雷击和侧面雷击
- 技术参数:
 - $P \leq 20\%$ (直击雷接闪概率)
 - $I_a \geq 75\%$ (衰减雷击点电流)
 - A (保护范围正在试验之中, 目前按保护角法)
- 特点: 可预防过顶雷击和侧面雷击, 使用在不希望发生直接雷击的场合。

附录 B (资料性)

雷电拦截器对雷击点电流的衰减效率

B.1 雷电拦截器的概念

雷电拦截器指在雷电下行先导端部电场作用下，产生比避雷针等地面突出物体更长的上行先导，率先吸引自然雷电放电（多脉冲放电）并衰减雷击点电流，在下风向一定距离内雷电不再放电而起到拦截（抑制）作用的装置。

B.2 雷电拦截效果监测

2022年8月9日16时，热水风电场11号风机机舱顶部安装的雷电拦截器拦截了一次雷电，安装在其引下线处的雷电监测系统显示共有3个脉冲，幅值分别为30kA，33kA，11.5kA。经中科院电工所采用其三维闪电定位系统检索，这一雷击发生的准确时间为2022年8月9日16时28分24秒381毫秒至16时28分24秒492毫秒；云地闪共有3次回击，雷电流强度分别为75.325kA、80.159kA、30.774kA。

B.2.1 同一次雷击认定三要素

风机雷电监测系统与闪电监测系统的雷击时间，雷击脉冲个数与地点一致，可认定为同一次雷击。

B.2.2 拦截器对雷电流的平均衰减效率

$$\eta = \left(1 - \frac{I_2}{I_1}\right) \times 100\% \dots \dots \dots (B.1)$$

式中：

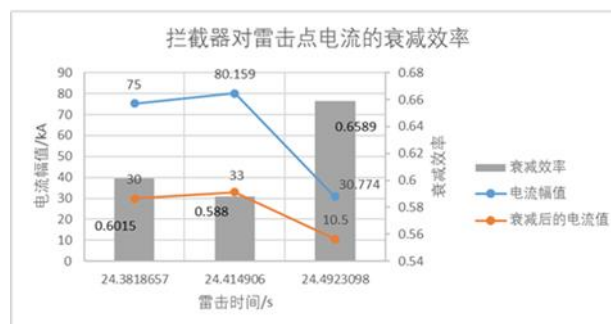
η ——衰减效率；

I_1 ——闪电定位系统监测的雷电流幅值，单位为安培（A）；

I_2 ——风机监测系统的雷电流幅值，单位为安培（A）。

此次雷击共有三个脉冲，第一个脉冲 $\eta = (1 - 30kA/75.325kA) \times 100\% = 60.15\%$ ；第二个脉冲 $\eta = (1 - 33kA/80.159kA) \times 100\% = 58.8\%$ ；第三个脉冲 $\eta = (1 - 10.5kA/30.774kA) \times 100\% = 65.89\%$ 。

计算结果表明，雷电拦截器平均衰减 $\eta = 184.84/3 = 61.6\%$ 。其衰减结果如图 B.1 所示：

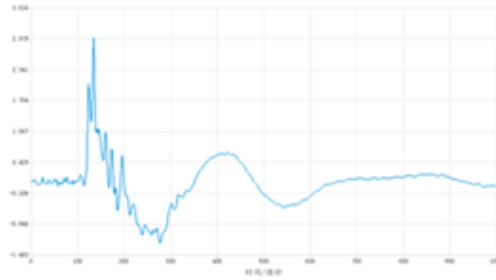


图B.1 雷电拦截器的衰减效率

B. 2. 3 雷电流的波形

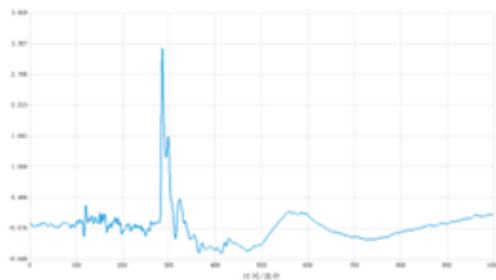
中国科学院电工所 VLF/LF 三维闪电监测网与定位地点相距最近的观测站是广西陆川站，距离约为 121km, 其次为海南琼海站，距离约 285km, 广西蒙山站，距离约 294 公里，记录的闪电电磁脉冲波形如下：

——第 1 次回击：发生时间 2022-8-19 16:28:24.3818657



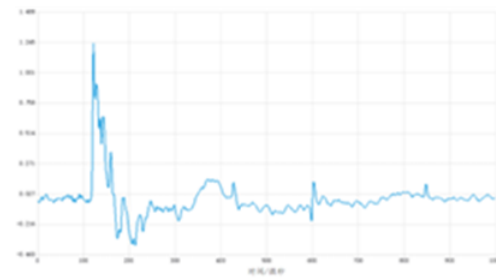
图B.2 第一个回击电流脉冲波形（陆川站）

——第 2 次回击：发生时间 2022-8-19 16:28:24.4149060



图B.3 第二个回击电流脉冲波形（陆川站）

——第 3 次回击：发生时间 2022-8-19 16:28:24.4923098



图B.4 第三个回击电流脉冲波形（陆川站）

B. 2. 4 雷电流波形参数

- 放电持续时间：111ms；
- 脉冲平均时间间隔：55.5ms（最小 33ms）；
- 雷电流平均幅值：62.086kA（最大 80.159kA，最小 30.774kA）；
- 电流极性：正极性。

附录 C (规范性)

多脉冲电涌保护器 MSPD 和高能吸收器 HEA 的技术参数

C.1 多脉冲电涌保护器MSPD

专门为低压配电系统研发的系列产品，其对电磁脉冲具有强大的吸收能力。

迄今为止，低压配电系统均使用按照 IEC-61643-2011《低压电涌保护设备—第 11 部分：连接到低压电力系统的电涌保护装置—要求和测试方法》或国家标准 GB18802.1-2011《低压电涌保护器 (SPD) 第一部分：低压配电系统电涌保护器—性能要求和试验方法》生产的电涌保护器，由于其采用单个脉冲检验，又称为单脉冲电涌保护器。

由于其试验方法与雷电的多脉冲放电不符，投入使用后如果遭到雷击，往往起火爆炸引起事故。

2014 年，中国发明了多脉冲电涌保护器 (MSPD)。

2017 年，经 IEC 批准，成为 IEC 61643-2011/2PFG《连接到低压电力系统的多脉冲电涌保护器附加试验—性能要求和试验方法》，多脉冲英文专有名词为：Multi-pulse，多脉冲电涌保护器的英文缩写为 MSPD。

2022 年，建设部，中国气象局联合颁布了 T/ASC 6001-2022《低压配电系统多脉冲电涌保护器—性能要求和试验方法》。

C.2 设计标准

- IEC 61643—2011 低压电涌保护设备 第 11 部分：连接到低压电力系统的电涌保护装置—要求和测试方法
- IEC 61643—2011/2PFG 连接到低压电力系统的多脉冲电涌保护器附加试验—性能要求和试验方法

C.3 多脉冲电涌保护器 (MSPD)

C.3.1 多脉冲电涌保护器 (T1)

- 模块尺寸：长 144mm×宽 70mm×高 90mm。
- 安装导轨标准：GB45-35mm。
- 技术参数：

表C.1 多脉冲电涌保护器 (T1) 技术参数

序号	项目	参数	序号	项目	参数
1	工作电压 U_0	690V	8	防护等级	IP20
2	最大持续工作电压 U_c	1200V	9	MSPD 类型	限压型
3	多脉冲组合波 MCW	MS-8/20 μ s-10P/40kA	10	使用模式	TN/TT
4	冲击电流 I_{imp}	≥ 12.5 kA	11	保护模式	L/N-PE
5	电压保护水平 U_p	≤ 2.5 kV	12	故障显示	LED
6	后备保护装置 T_d	$1.0s \leq t \leq 2.0s$	13	远程监测	有
7	电源频率 f	47-63Hz	14	组合方式	1P/2P/3P/4P

T/GSEE

C.3.2 多脉冲电涌保护器 (T2)

——模块尺寸：长 72mm×宽 70mm×高 90mm。

——安装导轨标准：GB45-35mm。

——技术参数：

表C.2 多脉冲电涌保护器 (T2) 技术参数

序号	项目	参数	序号	项目	参数
1	工作电压 U_0	220V	8	防护等级	IP20
2	最大持续工作电压 U_c	385V	9	MSPD 类型	限压型
3	多脉冲组合波 MCW	MS-8/20 μ s-10P/20kA	10	使用模式	TN/TT
4	冲击电流 I_{imp}	≥ 20 kA	11	保护模式	L/N-PE
5	电压保护水平 U_p	≤ 1.5 kV	12	故障显示	LED
6	后备保护装置 T_d	$1.0s \leq t \leq 2.0s$	13	远程监测	有
7	电源频率 f	47-63Hz	14	组合方式	1P/2P/3P/4P

C.3.3 1140V/1380V发电系统高能吸收器 (HEA)

——模块尺寸：长 72mm×宽 70mm×高 90mm。

——安装导轨标准：GB45-35mm。

——技术参数：

表C.3 1140V 高能吸收器技术参数

序号	项目	参数	序号	项目	参数
1	工作电压 U_0	1140V	8	防护等级	IP20
2	最大持续工作电压 U_c	1500V	9	MSPD 类型	限压型
3	多脉冲组合波 MCW	MS-8/20 μ s-10P/20kA	10	使用模式	TN/TT
4	冲击电流 I_n	≥ 20 kA	11	保护模式	L/N-PE
5	电压保护水平 U_p	≤ 3.5 kV	12	故障显示	LED
6	后备保护装置 T_d	$1.0s \leq t \leq 2.0s$	13	远程监测	有
7	电源频率 f	47-63Hz	14	组合方式	1P/2P/3P

表C.4 1380 高能吸收器技术参数

序号	项目	参数	序号	项目	参数
1	工作电压 U_0	1380V	8	防护等级	IP20
2	最大持续工作电压 U_c	1800V	9	MSPD 类型	限压型
3	多脉冲组合波 MCW	MS-8/20 μ s-10P/40kA	10	使用模式	TN/TT
4	冲击电流 I_n	≥ 40 kA	11	保护模式	L/N-PE
5	电压保护水平 U_p	≤ 6.0 kV	12	故障显示	LED
6	后备保护装置 T_d	$1.0s \leq t \leq 2.0s$	13	远程监测	有
7	电源频率 f	0-20kHz	14	组合方式	1P/2P/3P

注1: 因风机功率的不同, 1380V高能吸收器 (HEA) 用于风力发电机输出端, 1140V高能吸收器 (HEA) 用于变频器输出端。

注2: 高能吸收器不同于电涌保护器, 电涌保护器用于交流额定电压不超过1000V (有效值), 50/60HZ、直流电压不超过1500V的电路和设备; 高能吸收器的交流额定电压 $>1000V$ 且与发电系统额定电压一致。

T/GSEE

附 录 D
(规范性)

风电场区域防雷装置检测项目及技术指标

D.1 陆地风电场区域防雷装置检测项目及技术指标

表E.1 陆地风电场区域防雷装置检测项目及技术指标

序号	名称、型号	类别	位置	项目	判定方法	合格标准	备注
1	雷电拦截器（抑制器）	直击雷防护	机舱顶部、集电线路铁塔、升压站	1 腐蚀	目测	本体无腐蚀	
				2 紧固	扭力计	>150N	
				3 接地	毫欧表	<2.5mΩ	MIL-B-5087-B
				4 色散	专用仪器	相移大于 30°	
				5 波导曲线	专用仪器	衰减>10db	
2	多脉冲电涌保护器、高能吸收器 HEA	雷电强电磁脉冲防护	机舱控制柜、塔基控制柜、箱变	1 接线点温度	红外测温仪	与所在位置气温一致	
				2 本体温度	红外测温仪		
				3 接地点温度	红外测温仪		
3	光纤环网通信系统	雷电强电磁脉冲防护	塔基控制柜、塔基层层	1 光缆端口金属与芯线隔离	红外测距仪	与所在位置气温一致	端口金属包括铠装金属、碳素钢丝
				2 光缆端口金属接地	数字毫欧表	<2.5mΩ	
				3 备用光缆金属接地	数字毫欧表	<2.5mΩ	

				4 接地线长度或接线电感	卷尺、小电感测试仪	<30cm 或 0.025 μ H	100M 网，长度应 \ll 1/4 λ (0.75m)
4	自然雷电多脉冲智慧监测预警系统	雷电强电磁脉冲防护	机舱、塔基控制柜、塔基层层、 升压站、集中控制中心	1 信息采集传输系统电磁环境	干扰磁场测试仪	<10Gs	
				2 后台终端预警系统	计算机	运行程序及预警正常	
5	陆地风电场接地系统	雷电强电磁脉冲防护	陆地风电：塔基接地体、箱变接地体、升压站接地体、光缆井接地体	1 土壤电阻率	接地电阻测试仪	实测值 Ω /m	安装三点法接地电阻自动测试系统的此项免测
				2 工频接地电阻	接地电阻测试仪	$\leq 10 \Omega$	
				3 连接处搭接电阻	数字毫欧表	<2.5m Ω	
				4 接地线（扁钢） 腐蚀程度	目测	<20%	
6	海上风电场接地系统	雷电强电磁脉冲防护	塔基控制柜接地汇流排	1 海水电导率	电导率测试仪	实测值 S/m	安装回路法接地电阻自动测试系统的此项免测
				2 接地电阻	回路法电阻测试仪	$\leq 10 \Omega$	
				3 塔筒腐蚀程度	目测	评估	

本 标 准 用 词 说 明

为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 表示很严格,非这样做不可的用词：正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。
 - 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。
 - 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
 - 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。
-