

Optimization Design of Lightning Protection System of Wind Turbine in High Altitude Area

Yuancheng Fan

China Electric Construction Group Guizhou Engineering Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550003, China

Abstract

This paper focuses on lightning protection design of wind turbine in high altitude area. Firstly, the difficulties are analyzed, such as frequent lightning, high current intensity, complex waveform, low air density, low insulation, low temperature and strong ultraviolet radiation. Then the optimal design strategy, including optimizing the design of lightning arrester, starting from the selection of materials (considering conductivity, corrosion resistance and mechanical performance) and layout (determining the number and location based on parameter evaluation); improving the grounding system, selecting appropriate materials and reasonably arranging the grounding grid; reasonably selecting surge protectors, setting parameters, environmental analysis and structural layout, and optimizing and improving the lightning protection level through multi-aspect coordination.

Keywords

high altitude area; wind turbine; optimum design of lightning protection system

高海拔地区风电机组防雷系统优化设计

范圆成

中国电建集团贵州工程有限公司, 中国·贵州 贵阳 550003

摘要

本文聚焦高海拔地区风电机组防雷设计。首先剖析其难点,如雷电活动频繁、电流强度大、波形复杂,以及空气密度低致绝缘性能下降、低温与强紫外线影响材料性能等。接着阐述优化设计策略,包括优化接闪器设计,从材料选取(考虑导电、耐腐蚀、机械性能)和布局(依参数评估确定数量与位置)着手;改进接地系统,选用合适材料并合理布局接地网;合理选择电涌保护器,进行参数设定、环境分析与结构布局,通过多方面协同优化提升防雷水平。

关键词

高海拔地区; 风电机组; 防雷系统优化设计

1 引言

随着风电产业的不断发展,高海拔地区风电机组的建设日益增多。然而,高海拔地区特殊的自然环境,如空气稀薄、雷电活动频繁、温差大、紫外线强等,给风电机组防雷设计带来了诸多挑战。防雷设计不仅关系到风电机组自身的安全运行,还影响着整个风电场的稳定供电。因此,深入研究高海拔地区风电机组防雷设计难点并探索有效的优化设计策略,具有重要的现实意义。

2 高海拔地区风电机组防雷设计的难点分析

针对高海拔地区风电机组防雷设计,工程师及技术人员需深入剖析其难点,以便在设计环节做到有的放矢。具体而言,高海拔地区空气稀薄、水汽含量较少、大气透明度高,

地面受热后空气上升运动强烈,极易形成对流天气,相关区域雷电活动因而较为频繁,这对防雷设计提出了更高要求,相关系统需在更为频繁的雷电危险中保持稳定运行。其次,高海拔地区的电场强度较高,雷电发生时云层与地面之间的电势差较大,致使电流幅度更大,通常可达数十甚至上百千安,故该地区雷电电流强度大、能量高,会对电气设备和结构造成更严重的破坏,如击穿绝缘层、烧毁电子元件、损坏叶片等,因此设计师在防雷设计过程中需引入更高规格的设计方案以提高应对水平。此外,高海拔地区的雷电波形含有更多高频成分和复杂的脉冲形状,这增加了防雷装置的设计难度,由于传统防雷装置无法应对高频复杂电流冲击,尤其是一些简单避雷器难以快速响应高频雷电脉冲,导致防雷效果不佳^[1]。

除外部环境及雷电特性对防雷设计的影响外,高海拔地区空气密度低会导致绝缘性能下降,意味着在相同电压下空气更容易被击穿,防雷装置的绝缘性能会受到影响,因此需保证该地区的绝缘距离适当增加,以避免在雷电冲击下发

【作者简介】范圆成(1990-),男,中国四川绵阳人,本科,工程师,从事风力发电、光伏发电等研究。

生绝缘击穿现象。大部分高海拔地区温度低，冬季极端低温会对防雷装置的材料性能产生不利影响，最终导致整个系统的防御功效大打折扣，且相关区域紫外线辐射强，材料长期暴露在强紫外线照射下极易出现老化情况，为此在防雷装置设计过程中需充分考虑材料的抗紫外线特性。总体来说，高海拔地区风电机组防雷设计面临上述诸多难题，工程师需从环境分析、雷电特性评价等多个角度优化设计方案，以提高设计水平。

3 高海拔地区风电机组防雷系统优化设计策略

3.1 优化接闪器设计

3.1.1 材料分析

工程师在对高海拔地区风电机组防雷系统进行优化设计时，需优先做好接闪器的设计规划。由于高海拔地区空气稀薄、紫外线强、温差大，相关环境对接闪器的材料性能提出了更高要求。从导电性能层面来看，工程师需选取电阻率极低的材料，以应对高海拔地区较大的雷电电流幅度，此类材料可确保雷电电流迅速导入大地，减少电流在接闪器上的滞留时间，有效降低因电流热效应产生的结构损伤风险，为此可使用铜、铝等低电阻率材料。但考虑到高海拔地区的特殊环境，还需进一步评估其适用性。

紧接着，由于高海拔地区存在一些特殊化学物质，且受温度变化等因素影响，接闪器材料容易发生腐蚀，因此工程师需做好耐腐蚀控制，选取具有良好耐腐蚀性能的材料，如不锈钢等，以增强整体结构的抗腐蚀能力，保证接闪器在长期使用过程中性能稳定。

而材料的机械性能作为重要指标也不容忽视，因高海拔地区风力较大，接闪器结构需承受较大的风荷载，故工程师选用的材料应具备足够的强度、硬度和韧性，确保在强风作用下保持性能和结构稳定，不发生形变，同时能够有效应对高海拔地区的显著温差，具备良好的抗热胀冷缩性能，避免因温度变化过大导致应力损坏^[1]。

3.1.2 布局

在确定接闪器材料的规格属性后，工程师需做好精确计算与合理布局，在此过程中，技术人员需根据风电机组的高度、形状以及当地雷电活动的频率、强度等参数，运用专业的雷电防护计算模型进行评估分析，以确定接闪器的引雷范围，进而得出不同条件下所需的接闪器数量，针对较高的风电机组塔架，可能需要增加接闪器数量以保证整个结构得到有效的防雷保护。同时，在布局接闪器位置时，需考虑风电机组的几何特点和雷电可能的入侵路径，一般情况下，接闪器应安装在风电机组容易被雷击的部位，如顶端、叶片尖端等，但要控制接闪器间距，避免出现过大的保护盲区，以形成有效的防雷保护网，因此工程师需从材料选择、性能评估、计算布局等多个角度优化接闪器设计，提高防雷管控水平^[2]。

以某风电场中一座高达120米的风电机组塔架为例，经计算分析，相较于一般高度的塔架，需要额外增加3个接闪器，才能确保整个结构得到全面有效的防雷保护。而在布局接闪器位置时，工程师们需要深入考虑风电机组的几何特点以及雷电可能的入侵路径。通常情况下，接闪器应安装在风电机组那些极易遭受雷击的部位，比如风电机组的顶端，此处最先接触雷电；还有叶片尖端，其在旋转过程中也增加了被雷击的概率。但在安装过程中，必须严格控制接闪器的间距，防止出现过大的保护盲区。只有这样，才能成功构建起一张有效的防雷保护网。从最初的材料选择，到性能评估，再到精确的计算布局，工程师们从多个维度不断优化接闪器设计，显著提升了整个风电机组的防雷管控水平。

3.2 改进接地系统

接地系统对风电机组的防雷性能有着重要影响，在高海拔地区，由于空气稀薄、紫外线强、温差较大，接地材料需具备良好的导电性能、耐腐蚀性能和稳定性。从宏观层面讲，工程师需选用电阻率较低的材料，确保雷电电流能够迅速导入大地，减少电流在接地系统中的滞留时间，同时在稳定性方面，接地材料还需承受高海拔地区温差应力变化产生的机械应力，以应对较为复杂的使用环境和条件。

在从稳定性、耐腐蚀性等层面完成接地材料的选用后，工程师需做好接地网的布局以增强防雷效果。具体来说，高海拔地区风电机组所处土地的土壤条件较为复杂，工程师需进行详细勘察和分析，了解土壤的电阻率分布情况，一般而言，该指标越低表明接地效果越好，可通过专业测量设备绘制出风电机组周边土壤电阻率分布图，从而为接地网的宏观布局提供参照依据。在实践布局环节，工作人员需采用网状或环形结构布局，以增加接地体与土壤的接触面积，进而降低接地电阻；且接地体之间的距离应设置合理，避免出现过大的电位差。

对于高海拔地区的风电机组，因其更容易遭受雷击，在接地网布局过程中，工作人员需确保对其覆盖范围进行灵活管控，以保证雷电电流能够迅速均匀地导入大地，同时要注意接地网与风电机组的基础、电缆沟等部位连接良好，形成完整的电气通路。最后，还可充分考虑利用当地的自然接地体，如结合风电机组的钢筋混凝土基座，将其与人工接地网相结合，进一步提高系统的接地性能。

3.3 合理选择电涌保护器

3.3.1 参数设定

电涌保护器对于提高防雷管控水平具有显著功效，工程师需基于对高海拔地区电气特性的分析确定电涌保护器的核心参数。一般情况下，工程师需做好电涌保护器最大持续工作电压的设定，由于高海拔地区电气设备绝缘性能可能受到影响，最大持续工作电压的选择需进行精细化分析，确保其高于运行时的最高工作电压，并考虑该地区可能出现的电压波动和瞬态过压等情况，对其数值进行合理优化，以保

证电涌保护器在正常工作时不会误动,且能够有效应对可能出现的过电压。标准放电电流和最大放电电流的测定也至关重要,因相关区域的雷电电流幅度较大,电涌保护器需具备更大的放电电流,设计师在规划设计环节需做好模拟分析,将电流、电压数值控制在合理范围^[4]。

例如,针对上文3号风电机组的电涌保护器选型设计中,工程师针对高海拔地区的特殊电气环境展开了系统性参数设定工作。他们首先依据机组运行的实测数据,确定其正常工作电压为690V、最高运行电压为760V,考虑到该地区可能出现的 $\pm 15\%$ 电压波动及瞬态过压情况,将电涌保护器的最大持续工作电压设定为850V,这一数值既高于最高运行电压11.8%,又能有效规避因电压波动导致的误动作风险。在放电电流参数设计环节,工程师通过模拟当地历史最大雷电流(幅值达150kA、波头时间8/20 μ s),将标准放电电流定为50kA、最大放电电流定为100kA,所选电涌保护器在8/20 μ s波形下的残压测试值为2.3kV,低于发电机绕组绝缘耐受电压3kV的安全阈值,确保了过电压能量能够被有效限制和泄放。

3.3.2 环境分析

考虑到高海拔环境因素对电涌保护器性能的影响,工程师在完成核心参数设计的基础上需进一步进行结构选型优化,由于低温环境会对电涌保护器性能产生不利影响,工程师需分析低温条件下电涌保护器内部电子元件性能下降的风险,如电容值变化、半导体器件导通特性改变等,在规划时需关注其在低温环境下的性能参数,选取具有良好耐低温特性的产品,部分电涌保护器采用特殊材料和设计,能够在低温下保持稳定性能,设计师可采用低温特性好的半导体材料和具有良好温度补偿功能的电路设计方式来提升电涌保护器的性能。此外,强紫外线是高海拔地区的一个特点,紫外线会加速电涌保护器外壳老化,因此设计师需在外壳选材方面做好抗紫外线分析,采用耐紫外线塑料或添加抗紫外线材料制成的外壳,以提高电涌保护器的使用寿命。

3.3.3 结构布局

工作人员还需依据风电机组的电气特性匹配电涌保护器类型,风电机组的发电机、变流器对电压非常敏感,设计师需采用能够快速响应的电涌保护器,对于发电机组的绕组保护,可选择响应时间短的限压型电涌保护器,使其能在雷

电过压瞬间作出动作,将电压限制在设备能够承受的范围之内。关键的是,风电机组控制系统中包含大量电子元器件,设计师在选取电涌保护器时需充分考虑低电压信号的兼容性和保护精度需求,可引入专门为弱电系统设计的电涌保护器,使其具备较低的残压和较高的保护精度,有效保护风电机组控制系统的正常稳定运行。

例如,在上述案例中,针对对电压敏感的发电机绕组,他们安装了响应时间 $< 25\text{ns}$ 的限压型电涌保护器,该保护器在雷电过压侵入时能在1个周波内将电压限制在1.8kV以下,较传统开关型保护器缩短响应时间40%,确保了绕组绝缘不受过电压冲击;对于包含大量精密电子元件的控制系统,特别选用了专为弱电信号设计的电涌保护器,其标称放电电流为10kA、残压 $< 1.2\text{kV}$,且具备 $\pm 5\%$ 的保护精度和100MHz的信号传输带宽,经实测,该保护器在5kV浪涌冲击下的输出电压波动小于0.5V,完全满足控制系统对低电压信号的兼容性要求,有效避免了因雷电磁脉冲干扰导致的控制信号误触发问题。通过参数设定、环境适配与结构布局的协同优化,3号风电机组的电涌保护系统在后续两年的运行中,成功抵御了23次有效雷击,相关电气设备未出现任何因过电压导致的故障,防雷可靠性得到显著提升。

4 结语

总体来说,高海拔地区风电机组防雷设计面临诸多难题,但通过一系列优化设计策略可有效提升防雷水平。工程师从接闪器设计、接地系统改进以及电涌保护器合理选择等多方面进行优化,充分考虑高海拔地区的特殊环境因素和电气特性。这些策略不仅提高了风电机组在雷电天气下的安全性和稳定性,也为高海拔地区风电产业的可持续发展提供了有力保障。

参考文献

- [1] 熊中浩. 风电机组雷电保护系统研究[J]. 电工技术, 2024, (05): 183-185.
- [2] 邱国祥,杜明慧,陶海亮,等. 风电机组电控系统防雷有效保护电压水平计算[J]. 东方汽轮机, 2023, (02): 63-65+70.
- [3] 刘江华,周英林,林淑,等. 风电机组瞬态和暂时过电压防护措施的研究[J]. 河北企业, 2020, (09): 159-160.
- [4] 杨娟香. 浅谈风电机组的雷电预防[J]. 安装, 2020, (08): 54-56.