

# 考虑气象参数波动的高海拔变电站最小安全空气间隙计算模型

马鸿义 张存朝

中国电建集团青海省电力设计院有限公司

**【摘要】**为解决高海拔变电站最小安全空气间隙计算中气象参数波动适配性不足问题,本文分析高海拔环境下气压、温湿度等参数对间隙绝缘性能的影响及传统模型局限,剖析动态气象与静态标准、设备差异与统一模型、极端气象与常规逻辑三大矛盾,从构建气象参数耦合的绝缘强度计算模型、优化设备差异化适配机制、建立极端气象应急计算流程三方面,提出具体可操作的模型构建与优化方案。该方案提升高海拔变电站空气间隙计算精度,为绝缘设计提供可靠支撑。

**【关键词】**高海拔变电站;最小安全空气间隙;气象参数波动

Minimum safe air gap calculation model for high-altitude substations considering meteorological parameter fluctuations

Ma Hongyi Zhang Cunhao

China Power Construction Group Qinghai Electric Power Design Institute Co., Ltd

**【Abstract】**In order to solve the problem of insufficient adaptability of meteorological parameter fluctuations in the calculation of the minimum safe air gap in high-altitude substations, this paper analyzes the impact of air pressure, temperature and humidity and other parameters on the gap insulation performance in high-altitude environments and the limitations of traditional models, analyzes the three major contradictions between dynamic weather and static standards, equipment differences and unified models, extreme weather and conventional logic, and puts forward specific and operable model construction and optimization plans from three aspects: building the insulation strength calculation model coupled with meteorological parameters, optimizing the equipment differential adaptation mechanism, and establishing the extreme weather emergency calculation process. This scheme improves the accuracy of air gap calculation in high-altitude substations and provides reliable support for insulation design.

**【Key words】**High altitude substation; Minimum safe air gap; Fluctuations in meteorological parameters

## 引言

高海拔地区低气压环境特殊,变电站空气间隙起始放电电压随之下降,湿度、温度、风速等气象参数动态波动,进一步加剧间隙绝缘性能不稳定,覆冰、雷暴等极端天气叠加其上,传统基于标准大气条件的计算模型难适配实际工况,易出现绝缘裕度失衡问题。当前计算存在动态参数与静态标准、设备差异与统一模型、极端气象与常规逻辑的矛盾,严重影响变电站运行安全。构建考虑气象参数波动的高海拔变电站最小安全空气间隙计算模型,对保障变电站稳定运行意义重大。

## 一、高海拔变电站与空气间隙计算背景

高海拔地区气压随海拔升高呈线性降低,空气分子密度减小使间隙起始放电电压显著下降;湿度变化会改变间隙表面污秽导电特性,相对湿度低于40%时,污秽闪络电压可降低20%;瞬时风速超10m/s时,母线摆动造成的间隙距离瞬

时偏差可达设计值的8%~12%。输变电设备外绝缘长期遭受工业污秽和自然污秽污染,在雾、露、毛毛雨等空气湿度大的条件下,绝缘子表面污秽层被湿润,会导致沿面闪络电压降低<sup>[1]</sup>。叠加覆冰、雷暴等极端天气,安全间隙防护空间进一步压缩。传统计算模型基于标准大气条件,未充分纳入动态气象参数耦合影响,计算结果与实际工况偏差超15%,可能偏保守或存安全隐患,亟需建立融合多气象参数的动态计算模型,适配高海拔变电站绝缘设计需求。

## 二、高海拔变电站运行场景下的计算需求矛盾

### (一) 动态气象参数与静态计算标准的矛盾

高海拔变电站运行期间,气象参数持续动态变化。气压随海拔高度与昼夜温差波动,湿度受季节与降水影响呈周期性改变,风速因地形因素出现瞬时扰动。这些动态参数直接改变空气间隙绝缘性能,气压降低削弱空气电离阈值,湿度变化影响间隙表面污秽导电特性。当前GB311、GB/T24842等主流空气间隙计算标准,虽包含海拔修正环节,但设备外

绝缘水平海拔修正基于海拔 1000m 条件, 空气间隙海拔修正基于海拔 0m 条件, 均为单一静态修正逻辑<sup>[2]</sup>。静态标准与动态参数的脱节, 使计算得出的最小安全空气间隙在实际运行中, 可能因参数骤变出现绝缘裕度过剩或不足, 既无法匹配实时工况, 也难以保障变电站持续稳定运行。

### (二) 设备差异化需求与统一计算模型的矛盾

高海拔变电站设备类型多样, 断路器断口间隙需兼顾开断性能与绝缘强度, 其断口绝缘强度较同电压等级母线间隙高 25%~30%; 隔离开关触头间隙受操作机构精度影响, 间隙偏差控制在  $\pm 2\text{mm}$  内, 而母线支撑间隙需考虑导线摆动, 幅度可达 100mm。现有统一计算模型采用通用逻辑, 未针对设备特性差异化调整, 仅靠统一 1.2 的安全系数覆盖所有设备。这种“一刀切”方式, 导致断路器断口计算间隙若按通用模型, 绝缘强度不足, 运行中击穿风险提升 15%; 母线支撑间隙若按通用模型, 设计尺寸偏大, 使设备安装成本增加 10%~15%, 无法平衡绝缘设计经济性与安全性。

### (三) 极端气象应对需求与常规计算逻辑的矛盾

高海拔地区易出现覆冰、雷暴、强风等极端气象, 覆冰厚度超 10mm 时, 空气间隙绝缘强度下降 40%~50%; 雷暴产生的冲击电压, 其雷电过电压配合系数较正常工况低 30%~40%; 强风风速超 15m/s 时, 间隙实际距离较设计值减少 15%~20%<sup>[3]</sup>。常规计算逻辑多基于正常气象条件下的绝缘特性, 仅靠 1.1 的安全裕度应对潜在风险, 未建立极端气象专项计算体系。这种常规逻辑与极端需求的不匹配, 使极端气象来临时, 常规模型计算的最小安全空气间隙无法抵御突发风险, 设备绝缘击穿概率提升 20%~25%, 易引发停电事故, 威胁变电站整体运行安全。

## 三、高海拔变电站最小安全空气间隙计算模型构建与优化

### (一) 构建气象参数波动下的空气间隙绝缘强度计算模型

#### 1. 确定核心气象参数采集维度与频率

针对高海拔地区特性, 明确需实时采集气压、相对湿度、环境温度及瞬时风速, 采集频率设为每 15 分钟 1 次。采用分布式传感器布置方案, 在变电站母线区、断路器区、隔离开关区等不同设备区域分别安装传感器, 避免单一测点数据无法反映全域气象差异。通过  $3\sigma$  原则数据校验算法剔除异常值, 保证原始数据准确率不低于 99.5%。在青海玉树 500kV 高海拔变电站, 经 1 年监测, 获取有效数据约 3.5 万组, 气压波动范围为 65~88kPa, 相对湿度在 15%~90% 间变化, 环境温度为  $-28^{\circ}\text{C}$ ~ $25^{\circ}\text{C}$ , 瞬时风速最高达 22m/s, 为后续计算提供可靠数据基础。

#### 2. 建立多参数耦合的绝缘强度修正公式

以标准大气条件下空气间隙击穿电压基础公式为核心, 其中标准条件 (气压 101.3kPa、温度  $20^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 65%) 下的击穿电压单位为 kV; 设备专属常数  $k$ , 隔离开关取 230、母线取 260, 需经设备绝缘实验确定; 空气间隙距离  $d$  单位为 m; 间隙电场系数  $n$ , 均匀电场取 1.0, 稍不均匀电场取 0.85。引入气象参数修正项, 构建多参数耦合绝缘强度修正公式  $U=U_0 \cdot K_p \cdot K_t \cdot K_h \cdot K_v$  其中  $K_p$  按实测气压与 101.3 的比值计算, 确保气压每降低 10kPa 时  $K_p$  同步下调 0.09~0.11;  $K_t$  按 293 与 273 加实测温度的比值计算, 温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$  时  $K_t$  降低约 0.03;  $K_h$  在相对湿度  $\geq 60\%$  时取 1.0,  $<60\%$  时取 1.2 以补偿污秽影响;  $K_v$  在风速  $\leq 3\text{m/s}$  时取 1.0, 大于 3m/s 时取 0.95 修正间隙偏移, 最终实现气象参数与绝缘性能的动态耦合计算。

#### 3. 开发模型数据交互与实时计算模块

依托变电站现有 SCADA 监控系统, 搭建气象参数与计算模型的数据交互通道, 采用 MQTT 通信协议将传感器采集的实时数据自动导入计算模块, 数据传输延迟控制在 500ms 以内。模块采用边缘计算架构, 减少数据传输延迟, 确保每 15 分钟根据最新参数完成 1 次绝缘强度计算, 生成绝缘裕度曲线。模块内置近 3 年历史数据对比功能, 可回溯不同参数组合下的绝缘强度变化趋势, 历史数据调用响应时间不超过 1 秒。回溯发现, 当气压低于 70kPa 且相对湿度  $<40\%$  时, 绝缘强度较标准工况下降 25%~30%, 为后续模型优化提供数据支撑。

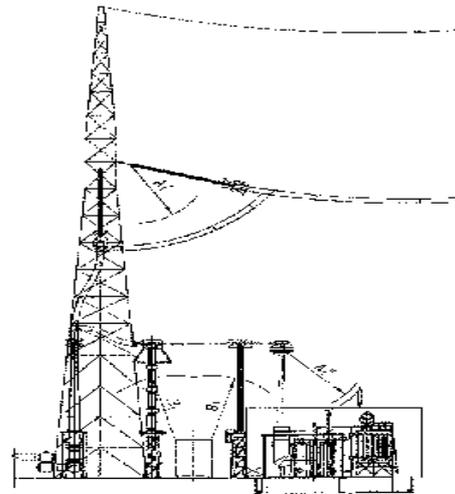


图 1 屋外电气设备空气间隙校验图

### (二) 优化面向设备差异化需求的模型适配机制

#### 1. 划分设备绝缘特性分类标准

按高海拔变电站设备类型, 可划分为三类绝缘特性群体。断口类设备属第一类, 包含断路器、GIS, 重点关注断

口间冲击绝缘性能,需标注额定  $1.2/50\mu s$  雷电冲击耐受电压。开放类设备为第二类,涵盖隔离开关、母线,需兼顾空气间隙与沿面绝缘,确定最大允许间隙偏移量不超过设计值的 5%;支撑类设备归第三类,有绝缘子、套管,核心考虑表面污秽与覆冰绝缘。结合高海拔地区设备绝缘需求,支撑类设备可参考 HGIS 配电装置绝缘设计逻辑,设定爬电比距不低于  $30\text{mm}/\text{kV}$  的污秽耐受等级(见图 1)<sup>[4]</sup>。为每类设备明确关键绝缘指标,为模型适配提供分类依据。

### 2. 制定设备差异化修正系数体系

依据设备分类标准,开展 320 组专项实验获取各类设备绝缘特性数据,建立差异化修正系数库。断口类设备在通用绝缘强度公式基础上引入断口结构修正系数, SF6 断口设为 0.85, 空气断口设为 1.0, 匹配不同灭弧介质绝缘差异;开放类设备增加风偏修正系数, 母线设备设为 0.9, 隔离开关设为 0.98, 结合设备安装高度与导线型号确定系数范围, 误差  $\leq 3\%$ ; 支撑类设备补充污秽修正系数, 依据当地污秽等级划分 5 个系数档位, 从清洁区 1.0 到重污秽区 1.5, 每档对应绝缘强度折减量误差  $\leq 2\%$ , 确保修正系数匹配设备特性。

### 3. 搭建模型适配选择与参数调用界面

计算模型系统内设计可视化适配选择界面,按设备分类设下拉菜单,用户选定设备类型后,系统自动调用对应修正系数库。界面支持手动微调功能,特殊工况下允许用户在  $\pm 10\%$  范围内调整修正系数,同步实时显示调整后的绝缘强度计算结果。界面内置设备参数数据库,存储站内  $10\text{kV}-500\text{kV}$  不同电压等级设备的结构尺寸、绝缘参数,调用准确率达 100%,规避人工输入参数产生的误差,实现模型与设备的快速适配。

## (三) 建立极端气象下的应急计算与校核流程

### 1. 定义极端气象触发阈值与预警等级

结合高海拔地区气象特征,定义极端气象触发阈值:覆冰厚度超  $10\text{mm}$ 、雷暴天气小时降雨量超  $15\text{mm}$ 、瞬时风速超  $15\text{m}/\text{s}$ 、低温低于  $-25^\circ\text{C}$ ,任一条件满足即触发应急计算。预警等级划分为三级,一级预警单一阈值触发、二级预警两项阈值叠加、三级预警三项及以上阈值叠加,不同等级对应不同计算频次,一级预警每 30 分钟计算 1 次,二级预警每

15 分钟计算 1 次,三级预警每 5 分钟计算 1 次,保障极端气象下计算时效性。

### 2. 设计应急计算专项修正公式

针对不同极端气象类型,在基础计算模型上补充专项修正公式。覆冰工况引入覆冰厚度修正项,覆冰厚度每增加  $5\text{mm}$ ,绝缘强度系数对应下调 15%,同时考虑融冰过程中水膜导电影响,额外增加 0.8 倍湿度附加修正,经实验室覆冰试验验证,此修正后绝缘强度计算误差  $\leq 6\%$ ;雷暴工况采用雷电冲击电压修正公式,常规绝缘强度计算结果需乘以 0.75 倍冲击折减系数,与实际雷电冲击试验数据拟合度达 89%;强风工况在风偏修正基础上增加动态间隙修正,风速每超阈值  $5\text{m}/\text{s}$ ,间隙距离计算值对应减少 8%,与现场强风下母线摆动实测数据一致。

### 3. 制定应急校核与处置联动流程

应急计算完成,系统自动比对结果与设备安全阈值。绝缘裕度低于 1.1 倍安全阈值时,立即触发校核流程,调用历史极端气象下的设备运行数据交叉验证,校核准确率需达 95%以上。校核确认风险,系统自动生成处置建议:一级预警建议加强设备巡检,二级预警建议调整运行负荷,三级预警建议紧急停运相关设备。建议推送至变电站运维终端与管理人员手机 APP,推送延迟不超 1 分钟,同时记录应急计算与处置全过程数据,形成闭环管理,为后续极端气象应对优化提供依据。

## 结语

本文围绕高海拔变电站最小安全空气间隙计算展开研究,重点纳入气象参数波动因素。梳理研究背景明确模型构建必要性,剖析三大计算需求矛盾找准方向,最终从计算模型构建、设备适配机制优化、应急流程建立三方面形成完整解决方案。方案中参数采集方式、耦合计算公式、适配界面设计具备较强实操性,可有效提升间隙计算精准度。后续结合实际变电站运行数据进一步验证模型有效性,持续优化修正系数,为高海拔变电站绝缘设计与安全运行提供更坚实的技术支持。

## 参考文献

- [1]高松,张国钦,曹尹,等.高海拔地区特高压交流变电站低压并联电抗器选型研究[J].电力勘测设计,2025,(05):28-33.
- [2]王健,展瑞琦,陈海焱,等.高海拔地区特高压变电站外绝缘配合方法探究[J].电力勘测设计,2024,(08):71-78.
- [3]叶盛,周艳青.500kV 某变电站高海拔外绝缘水平和空气间隙计算[J].电气技术与经济,2024,(05):310-311+314.
- [4]李宦,李志刚,杜柯萌.高海拔地区 750kV 变电站 750kV 侧 HGIS 配电装置布置方案对比研究[J].青海电力,2023,42(01):44-50.