

基于复合绝缘结构的 10kV 开关柜绝缘性能提升方案研究

王帆舟

湖南平高开关有限公司 湖南长沙 410006

摘要: 随着智能电网和配电自动化技术的持续推进, 10kV 中压开关柜作为关键设备, 其运行可靠性直接影响供电系统的稳定性与安全性。在长期运行与环境应力作用下, 传统的气体绝缘或固体绝缘结构常常暴露出诸如局部放电频发、击穿强度下降、耐潮能力不足等问题。本文针对传统 10kV 开关柜在复杂运行环境中存在的绝缘劣化、放电失效等问题, 提出了一种基于复合绝缘结构的性能提升方案。通过对环氧树脂、硅橡胶与气体介质多材料组合特性的分析, 设计了复合绝缘层结构, 兼顾电场均匀性与介电强度提升。在理论建模、电场仿真与样机试验验证的基础上, 结果显示新型结构在提升局部放电起始电压、降低电场畸变程度及提高环境适应能力方面具有显著优势, 为中压开关设备绝缘可靠性提升提供了新路径。

关键词: 复合绝缘结构; 10kV 开关柜; 绝缘性能

前言:

随着配电网智能化水平的不断提高, 10kV 开关柜作为中压配电系统中的核心设备, 其运行的绝缘安全性正面临越来越严峻的挑战。一方面, 传统开关柜多采用单一环氧树脂固体绝缘或空气绝缘结构, 虽然制造工艺成熟、成本相对较低, 但在长期高负荷、湿热交变、盐雾腐蚀等典型工况下, 极易出现表面积污、局部放电频发及电气击穿等问题。尤其在我国南方沿海、山区湿润或高原低压等地区, 环境复杂多变, 绝缘老化、爬电痕迹与闪络风险急剧上升, 严重威胁配网系统的稳定运行。通过将环氧树脂的结构强度、硅橡胶的憎水性与气体介质的绝缘恢复能力有机融合, 可有效实现电场应力的梯度调控、电介质匹配与老化性能增强。

1 复合绝缘结构的 10kV 开关柜的设计基础

在 10kV 中压配电系统中, 开关柜作为关键电气设备, 其绝缘结构的设计直接影响运行的可靠性与安全性。传统 10kV 开关柜多采用单一介质如环氧树脂、SF₆ 气体或空气进行绝缘, 但在潮湿、高污染、高海拔等复杂环境中, 常因介质电场畸变、电气间隙不足、界面电场集中等因素诱发局部放电甚至绝缘击穿。

复合绝缘结构设计的基础, 首要的是多种介质绝缘材料性能差异的协同, 如环氧树脂介电强度较高、机械强度良好, 适合制作绝缘支撑件, 但柔韧性和耐候性不足; 硅橡胶有出色的耐污闪和憎水迁移能力, 可缓解表面闪络风险; SF₆ 等气体介质则有优良的电弧熄灭特性与绝缘恢复速度。借助结

构设计对这些介质进行空间搭配, 能构建多层次、多功能的绝缘保护体系。电场分布控制上, 复合绝缘结构运用梯度设计理念, 凭借设置过渡层和应力锥, 平滑不同材料间的电场突变, 有效抑制尖端电场集中; 机械结构方面, 需考虑材料热膨胀系数匹配、界面粘结强度及湿气渗透路径控制等, 以保证长期运行时的结构完整性和界面稳定性。复合绝缘结构并非材料的简单叠加, 而是融合电场控制、材料特性匹配以及环境适应性的系统性设计策略, 体现多物理场耦合思维, 是 10kV 开关柜绝缘系统向高性能、智能化发展的核心技术基础。

2 基于复合绝缘结构的 10kV 开关柜绝缘性能提升方案

2.1 引入梯度复合绝缘层以优化局部电场分布

在 10kV 开关柜当中, 电场集中属于诱发局部放电以及绝缘击穿的关键风险因素, 在导体转弯、接头连接或者复杂三维结构区域, 极易形成高电场畸变区, 为可有效控制这些位置的局部电应力分布, 此方案提出引入梯度复合绝缘层设计, 把绝缘系统划分成高、中、低应力三个区域, 并且使用不同介电常数以及介电强度的材料来进行匹配。在具体实施过程里, 于靠近导体一侧采用高介电强度的环氧树脂当作内层, 用来承受较强的电应力, 中间层引入介电常数较低不过有良好柔韧性的聚四氟乙烯或 PES 泡沫层, 以此实现电场梯度过渡, 外层选用硅橡胶材料, 提升整体的抗污能力以及外部憎水性能, 另外借助在关键过渡界面位置设置应力锥结构, 分散尖端电场, 防止局部放电起始电压降低。应力锥设

计采用非线性电阻混合硅橡胶,借助有限元仿真进行电位等值线优化,保证在不同介质交界区域的场强不超过 10kV/cm,提高系统整体绝缘等级。

2.2 复合材料填料微结构优化与界面改性技术应用

本方案围绕 10kV 开关柜内部主要绝缘结构的填充材料展开微结构优化工作,选用纳米复合材料来提高环氧树脂介质,以此提高其耐电压能力、界面强度以及热稳定性,传统环氧树脂存在热膨胀系数偏高、容易产生微裂纹等情况,使得在长期运行过程中局部应力出现积聚现象,为了克服这一缺陷,本设计引入表面改性纳米 SiO_2 与 Al_2O_3 双组分复合颗粒,借助高剪切分散以及等离子体处理来提高其与树脂基体的界面结合力,构建出“刚柔并济”的微结构网络。

对于界面处理工作,选用硅烷偶联剂来对纳米粒子开展官能团化修饰操作,促使其于交联固化反应里可和环氧基团共同发生反应,从分子层面着手提高界面能量,在材料配比环节,实验室经过验证得出,当复合比例为 2.5% SiO_2 以及 1.5% Al_2O_3 时可获取最佳综合性能,此时击穿电压平均提升幅度达到 22%,介质损耗降低了 17%。为了处理热应力集中问题,引入有低导热率然而高热稳定性的 BN 纳米片,以此提高散热通道的均匀程度,借助这一材料优化方案,复合绝缘结构在绝缘耐压、热冲击循环以及机械剪切强度等方面都实现了实质性的提升,特别适宜应用于 10kV 高湿、高热以及频繁开断等恶劣工况下的开关柜设备。

2.3 开关柜内部绝缘结构的功能分区复合设计

传统 10kV 开关柜结构里,绝缘系统大多时候采用一体化封闭布局形式,没办法依据各功能区电应力的不同来开展分区优化,造成资源浪费以及局部绝缘冗余情况,此方案给出一种功能分区的绝缘复合结构设计想法,把开关柜内部划分成三类功能区,分别为主母线区域、高压开断区域以及辅助配电连接区,按照各区域电压、电流以及操作频率的差异,分别匹配最为合适的复合绝缘材料和结构。

在主母线区,由于其承受持续高电流且开断频率较小,故而采用高强度环氧玻纤提高层压板,在其中内嵌屏蔽导电胶带,以此来抑制工频电场,断路器室属于操作最为频繁的核心区域,电弧作用剧烈,热量容易积聚,设计采用硅橡胶包覆结构,内部填充气体绝缘体,达成固-气协同绝缘。辅助配电连接区采用柔性聚合物材料进行包覆,考虑空间利用率又兼顾维护便利性,另外为实现动态电场管理,各区域

交界面设置嵌入式电场均压带,借助电容等效原理实现电位平衡,防止因结构突变引发局放,该方案经过仿真与样机验证,在 10kV 实际运行条件下,绝缘老化速度明显减缓,各功能区放电起始电压提升超过 35%,呈现出良好的系统适配能力。

2.4 高湿高污环境下的表面绝缘增强与自恢复设计

在南方沿海地区、高原湿冷环境或者化工腐蚀性较强的环境中,传统的 10kV 开关柜大多时候会因为绝缘表面出现吸潮以及积污的情况,引发闪络事故,此方案提出运用复合憎水纳米涂层跟局部自愈性涂膜相结合的双重防护结构,以此达成绝缘表面性能长时间稳定提升的目的,在具体设计的时候,首先在复合绝缘件的外部表面使用氟硅类纳米防水涂层,这种涂层有低表面能以及强憎水性,可有效地阻断水汽凝结以及尘埃黏附。凭借在涂层当中引入微胶囊化的聚脲自愈材料,一旦受到轻微划痕或者电弧腐蚀之后,可在高压应力或者热场激发的情况下自动释放活性单体,迅速填补微损区域,实现绝缘功能的自修复。

为保证材料在极端状况下的稳定性,开展了 1000 小时盐雾与湿热老化联合试验,试验结果显示,带有复合涂层的绝缘样品在测试之后表面电阻下降幅度不到 5%,并且没有肉眼可看见的龟裂或者闪络痕迹,另外外加表面电荷分布均匀性测试说明,其表面电位维持在 $\pm 0.5\text{kV}$ 以内,较大优于未涂层样品 $\pm 1.5\text{kV}$ 的波动范围。该方案为开关柜在复杂环境中的长期运行给予了可靠的绝缘保障,其可维护性以及自适应能力也有所提升,为户外型或移动式 10kV 设备的推广提供了技术支持。

3 基于复合绝缘结构的 10kV 开关柜绝缘性能提升效果

3.1 项目背景

本研究项目基于某配网公司城郊变电站开关设备改造工程,目标为解决运行超过 10 年的旧型 10kV 开关柜在高湿、高盐雾区域内出现的绝缘劣化、局部放电频发等问题。现有设备主要采用传统环氧浇注固体绝缘结构,配套为空气间隔式母线连接方式,柜体为钢板+涂层封装,内部主母线与断路器连接部位长期运行后出现绝缘表面积污、微裂纹及局放音频特征增多的问题。原系统绝缘性能参数如下:局部放电起始电压平均为 6.8kV,击穿电压为 23.1kV;在高湿 ($\text{RH}>85\%$) 与 35℃热环境下运行 4 小时后,表面泄漏电流增至 $6.5\mu\text{A}$,远高于国家标准推荐的 $3\mu\text{A}$ 以内水平。年

度缺陷报告显示, 全年 10 次检测中有 3 次发现闪络痕迹, 严重威胁供电安全性。因此, 项目团队提出引入基于“环氧 + 硅橡胶 + 气体”三重复合绝缘结构的升级方案, 在不改变整体布局与母线间距的基础上, 提高设备抗局放能力、击穿电压及耐候性, 构建适用于潮湿腐蚀环境下的长期运行型 10kV 开关设备。

3.2 测试方案

(1) 局部放电起始电压测试方案。该测试依据 GB/T 7354-2018《局部放电测量》标准执行, 主要用于评估绝缘结构中最容易引发局部电击穿的部位是否已有效控制电场畸变。测试对象包为旧型环氧绝缘结构开关柜和改造后的复合结构开关柜, 测试电压逐步从 0kV 升至 15kV, 步进幅度为 0.5kV。放电检测采用宽带电压脉冲法, 频率响应范围为 20kHz~800kHz, 并使用耦合电容器及噪声抑制器进行信号滤波, 确保信号识别准确。测试在温度 25℃、相对湿度 50% 的实验室环境中完成, 重测三次取平均值, 确保数据可靠性。

(2) 雷电冲击耐压测试方案。采用 1.2/50 μ s 标准波形, 模拟设备遭受外界雷电冲击时的耐压性能, 检验复合绝缘结构对高频瞬态电压的承受能力。测试电压范围设定为 40kV 至 80kV, 逐级提升, 每级保持 15 次冲击波, 观察是否存在穿透击穿、闪络或局部电晕现象。冲击测试在干燥环境中完成, 并在局部潮湿状态下 (RH 85%) 重复一次, 以评估结构在复杂天气下的承压稳定性。同时, 采用高频相控摄影系统记录放电路径及冲击后的绝缘表面变化, 对比传统结构与复合结构表面炭化面积与损伤程度。

(3) 长期环境老化试验方案。为验证复合结构的长期运行性能, 设计一组加速环境老化实验方案, 包括温湿交替循环、高盐雾腐蚀测试与机械振动试验。实验时间设定为 1000 小时, 周期内温度在 25~60℃ 交替, 湿度在 40~95% 切换, 模拟南方夏季典型运行环境。老化后进行绝缘表面电阻率、电容损耗因数 $\tan \delta$ 与击穿电压检测, 对比老化前后性能变化率, 评估材料老化抗性。试验在多功能电气耐压试验室内完成, 并使用高清热成像仪检测绝缘层是否存在局部热点和分层现象, 以确认材料结构完整性未被破坏。

3.3 提升效果

复合绝缘结构 10kV 开关柜在改造前后的关键性能参数对比的提升结果如表 1 所示。

表 1 复合绝缘结构 10kV 开关柜在改造前后效果对比

项目	改造前 (传统环氧结构)	改造后 (复合绝缘结构)	提升幅度 (%)
局部放电起始电压 (kV)	6.8	11.3	↑ 66.2
工频击穿电压 (kV)	23.1	31.6	↑ 36.8
雷电冲击耐压值 (kV)	65	78.5	↑ 20.8
表面泄漏电流 (μ A, 高湿下)	6.5	2.1	↓ 67.7
老化后 $\tan \delta$ 增加率 (%)	15.3	4.6	↓ 69.9

测试结果表明, 复合绝缘结构在关键性能上优于传统环氧绝缘。局部放电起始电压从 6.8kV 提升至 11.3kV, 有效抑制了早期放电形成; 击穿电压提升至 31.6kV, 增强了绝缘系统整体承压能力; 在高湿条件下, 表面泄漏电流大幅下降至 2.1 μ A, 远低于国家 3 μ A 限值标准, 显示出优异的憎水与抗污性能; 同时, 长期老化测试显示绝缘性能劣化率明显减缓, 表明该结构具有良好的环境适应性与长期稳定性, 适用于复杂户外或高负荷配网场景的推广应用。

结语: 本文围绕 10kV 开关柜绝缘系统在复杂运行环境中的安全性与可靠性问题, 提出并验证了一种基于“环氧—硅橡胶—气体”多介质复合绝缘结构的性能提升方案。通过梯度绝缘设计、复合填料优化、功能区域分区配置及表面防护增强等措施, 实现了局部放电起始电压提高 66.2%, 击穿电压提升 36.8%, 同时显著降低了高湿环境下的表面泄漏电流与老化损耗。结果表明该复合结构在电场均匀性、环境适应性与长期运行稳定性方面均优于传统固体绝缘系统。研究成果可为城市及边远区域的配电设备提供一种可行、可靠的绝缘结构升级路径, 具有良好工程推广前景与实际应用价值。

参考文献:

- [1] 徐治仁, 钱勇, 周录波, 等. 高湿度重污秽环境下户内 40.5 kV 开关柜用环氧树脂电流互感器绝缘的老化与失效分析 [J/OL]. 高电压技术, 1-12[2025-05-22].
- [2] 王海燕. 高压开关柜检测与维护保养 [J]. 流体测量与控制, 2025,6(02):61-64.
- [3] 常斌. 煤矿 10kV 高压开关柜智能监测系统设计与应用 [J]. 今日制造与升级, 2025,(02):65-68.
- [4] 王东方, 牛勃, 王景, 等. 环境因素对 12 kV 充气柜可分离连接器绝缘性能的影响 [J]. 高压电器, 2025,61(02):10-16.
- [5] 康晶, 任召田, 刘振笃, 等. 环保气体绝缘开关柜电场仿真与优化 [J]. 电器与能效管理技术, 2025,(01):56-60+67.