

高压绝缘子材料老化检测与防护措施

赖雯 曾清 王鹏尔 唐钱生 余汝强
萍乡市信源电瓷制造有限公司 江西萍乡 337200

摘要：高压绝缘子材料老化检测与防护对于保障电网安全稳定运行，延长设备使用寿命十分关键，而材料老化机理分析与检测技术应用属于设备运维的重要部分，该工作质量会左右绝缘子的绝缘性能以及输电线路的运行安全。高压绝缘子由于长期暴露于复杂环境，承受电气负荷与机械应力作用，所以极易出现材料性能衰退和绝缘失效问题，这成了电网运维质量控制的重点与难点，文章先分析高压绝缘子材料老化的诱发机理，接着全面论述不同的老化检测技术体系以及全周期防护措施的新应用情况，最后归纳出技术应用的主要原则及其后续发展走向，从而给高压电网运维项目赋予技术支持。

关键词：高压绝缘子；材料老化；老化机理；检测技术；防护措施

引言

电网电压等级不断提升，输电线路覆盖范围也有所扩大，既有的高压绝缘子其耐候性能和绝缘性能已无法适应复杂的运行需求，所以绝缘子材料老化检测与防护工作就成了电网运维升级的主要途径。材料老化检测与防护属于高压绝缘子运维的关键步骤，要达成老化状态的精准诊断与高效防护，不过由于运行环境，材料类型，服役年限等方面的差别，绝缘子极易产生憎水性丧失、裂纹扩展、绝缘击穿之类的病害，这些病害极大地影响到绝缘子的使用品质及其使用寿命。以往的处理手段往往只是采取单一的检测或防护方法，并不能准确地符合不同老化类型绝缘子的需求，因而很难从根本上解决材料老化和绝缘失效的问题。打破传统运维思路，形成适合不同老化机理的技术体系，更新全周期防护模式，这对改善高压电网运维工程质量，保证电网安全畅通有着重要意义。

一、高压绝缘子材料老化的诱发机理与特性解析

（一）材料老化的多维度诱发路径

从环境、电气、机械这三维角度去分析高压绝缘子材料老化的发生及其变化情况。环境方面，高压绝缘子长期经受日晒雨淋、盐雾腐蚀、温差剧变，造成瓷质绝缘子釉面开裂、复合绝缘子硅橡胶外套粉化，从而致使材料性能逐步衰退。电气方面，绝缘子表面的局部放电、电晕腐蚀会破坏材料表层结构，产生的臭氧与氮氧化物会加速绝缘损伤，而且进一步发展成绝缘电阻下降、泄

漏电流增大之类的老化状况。机械方面，长时间承受导线拉力、微风振动、覆冰荷载，使得绝缘子内部产生应力集中，促使老化更快恶化，最终影响到高压绝缘子整体结构的稳固性与绝缘性。

（二）不同类型绝缘子的老化特性识别

准确识别不同类型绝缘子的老化特性，是制订针对性治理技术的基础。关注瓷质绝缘子的老化特性，剖析其釉面开裂、瓷体酥松、金属附件锈蚀等老化表现；关注玻璃绝缘子的老化特性，考量其自爆隐患、钢化层脱落、绝缘强度下降等状态参数；关注复合绝缘子的老化特性，比较其憎水性丧失、芯棒脱胶、护套龟裂等老化规律，找出不同类型绝缘子老化的薄弱之处。

（三）多因素耦合对材料老化的影响机理

环境、电气、机械多因素耦合作用，会影响绝缘子材料老化进程，其影响机理如下：环境因素会破坏材料表层防护结构，造成内部组织暴露于侵蚀环境，这会造成材料老化速度加快。电气因素会引发材料的化学性能变化，造成绝缘分子链断裂，从而产生不可逆的绝缘损伤。机械因素会加剧材料内部的微观裂纹扩展，加重多因素耦合的老化效应，还可能引发绝缘子断裂、闪络之类的故障，给检测与防护技术的研发给予理论依照。

二、适配老化特性的高压绝缘子检测技术体系

（一）离线检测型诊断技术

创建离线检测型诊断技术体系来解决绝缘子老化精准诊断的需求。使用绝缘电阻测试、介电损耗角正切值测量等手段，可以判断绝缘子的绝缘性能衰退程度，做

到老化状态的定量分析。研发退役绝缘子解剖试验工艺，经由微观结构观察、材料成分分析，明确老化的核心诱因。运用红外热成像检测技术，对停电检修的绝缘子开展全面扫描，精准识别局部发热点，定位内部绝缘缺陷。

（二）在线检测型监测技术

针对绝缘子常态化老化监测的需求，研发出在线检测型监测技术。对运行中的绝缘子执行超声波检测、紫外成像检测，实时捕捉内部裂纹振动信号与表面电晕放电位置，达成老化状态的动态监测。采取泄漏电流在线监测技术，在绝缘子串上安装监测装置，实时反映表面污秽与老化程度，减轻人工巡检的工作强度。并推行物联网数据传输技术，综合考虑检测效果和电网智能化运维需求。

（三）智能检测型预警技术

针对不同类型绝缘子的老化特性与监测需求，更新智能检测型预警技术。利用大数据与人工智能技术构建绝缘子老化诊断模型，整合离线检测的静态数据与在线检测的动态数据，实现老化程度的精准评估；研发智能化预警系统，凭借算法模型预判绝缘子老化趋势，提前发出故障警报，优化运维决策效率；运用无人机巡检技术，搭载高清摄像头与检测传感器，对偏远区域绝缘子开展全覆盖检测，积极适应复杂地形的运维状况。

三、全生命周期高压绝缘子老化防护管控体系

（一）运维前的老化预判与方案优化

运维前要预判老化趋势并改良方案，这是高压绝缘子老化防护的关键步骤，主要目的是准确预判老化规律，制订有针对性的防护方案，从而防止绝缘失效问题发生，给后续运维和养护阶段的老化防护打下根基。做老化预判时，要创建起“多源数据融合+多模型耦合”的预判系统，把绝缘子出厂参数、运行环境数据、历史检测记录以及同类设备老化案例统统整合起来，塑造起完备的预判数据基础。绝缘子出厂参数包含材料类型、结构设计、性能指标等，这些数据能确定它的抗老化基础能力；运行环境数据应当覆盖区域气候、污秽等级、雷暴频率等信息，清楚表明环境因素对老化产生的影响；历史检测记录还要对比绝缘子不同时期的绝缘电阻、泄漏电流、憎水性等指标，量化运行年限给老化带来的影响程度。在预判方法方面，采取数值模拟和现场试验关联的办法来改善预判结果的准确性。利用有限元分析软件创建绝缘子老化的数值模型，模拟不同环境、荷载条件下的老化情形，预估绝缘子的老化速度、性能衰退程度以及故障发生概率；而且，在典型区域展开绝缘子加速老化试

验，得到真实的老化反应数据，以此来验证并修正数值模拟模型，保证预判结果符合电网运维实际情况。凭借精准的老化预判成果，执行防护方案的改良设计。对于预判出老化风险较高的重点区域，要调整防护技术的结合形式，比如在高污秽区域采用防污闪涂层处理，在高雷暴区域加装防雷附件；改良运维工艺参数，明确绝缘子的检测周期、清扫频率、维护标准等，使得运维过程中老化风险可控；还要制订老化防护的量化目标，明确各个运维阶段的性能允许偏差，给后续运维过程中的老化防护赋予清晰的标准依照。

（二）运维过程的老化实时监测与动态调控

运维过程对于高压绝缘子老化防护而言非常关键，在此期间开展老化的即时监测并执行动态调节，可以及早察觉性能偏差，并经由调整运维参数来做到老化的精准控制，免除因老化程度逐步加深而产生的绝缘故障。形成起“全域覆盖，随时感知，精准提示”的老化即时监测体系，这是达成动态调节的前提所在。该监测体系应牵涉输电线路的关键区段、高风险区域绝缘子以及老旧设备，要设置各类自动化检测装置，比如泄漏电流传感器、紫外成像装置、红外测温设备等，从而达成对绝缘性能、表面状态、发热情况的实时监测。创建智能化的数据分析模型，对即时监测得来的数据执行即时处理，比较绝缘子不同时期的性能参数、老化趋势，以此来判断老化是否处于可控范围。设置多级警报阈值，按照性能偏差的严重程度划分出黄色、橙色、红色的警报等级，一旦监测数据到达警报阈值，控制平台就会自动发出警报，通知运维人员及时采取干涉措施。如果绝缘子泄漏电流达到黄色警报值，就要增加检测频率，探究性能偏差的原因；而要是达到红色警报值，那就立刻启动应急预案，采取停电检修、更换设备等手段来阻止故障的加剧。根据监测警报结果，执行运维参数的动态调控，针对老化偏差产生的原因，精准调整运维工艺。如果是因为表面污秽积累造成的性能偏差，就要及时开展带电清扫，恢复绝缘子绝缘性能；如果是由于局部放电致使老化加剧，就要改进电场分布，加装均压环；要是因为材料本身抗老化能力不足引发性能衰退，就要更换耐候性更强的绝缘子。而且，还要创建起“监测-分析-调控-验证”的封闭式运作流程，每次完成调控以后，不断跟进监测数据，考察调控措施是否有效，按照验证结果进一步改良调控方案，保证高压绝缘子的老化状态一直维持在协调可控的范围内。

（三）运营阶段的老化长期跟踪与养护干预

高压绝缘子处于运营阶段时，会因环境侵蚀、电气负荷和机械应力长时间作用而出现后期老化现象，如果不展开长期追踪并给予养护干预，就极易造成老化程度逐步积累，从而致使绝缘子闪络、断裂等病害发生，进而影响到电网的使用品质以及供电安全。所以，形成运营阶段的老化长期跟踪及养护干预体系十分关键，这对于保证高压绝缘子具有长久的稳定性而言非常必要。该老化长期跟踪体系应包含绝缘子服役的整个生命时段，而且要制订出科学的追踪检测方案。在运营初期，因为绝缘子性能衰减速度较快，所以检测频率应当加大，每季度都要做一次全面检测，这样就能及时把握后期老化的变动规律；等到运营5到8年之后，如果性能趋于稳定，就可以酌情减小检测频率，改为每半年或者一年执行一次检测任务；还要创建起长期的检测档案，把所有的检测数据汇集起来，剖析老化会长期存在的趋向，评判绝缘子能否长久稳固。监测内容除了绝缘性能指标之外，还要包含表面状态、附件完好度等，从而全方位了解老化给绝缘子使用性能带来的影响。创建依靠老化状态的病害警报与养护干预机制，做到“尽早察觉，尽早解决”。按照长期监测的数据，并结合绝缘子运行故障的情况来制定养护干预的触发标准，当老化速度超出允许范围、性能参数到达故障发生的临界点或者绝缘子出现明显的老化损伤的时候，就要立即采取养护干预措施。针对不同种类的老化病害，采取不同的养护技术。养护干预期间，要重视技术的适配性与环保性，首先选择绿色环保的养护材料与工艺，缩减对周边环境的影响，还要依照电网的运行负荷状况，恰当规划养护施工时间，采用带电作业、分时段检修等方法，最大程度地减轻养护作业对电网供电的影响。也要创建起养护效果评价机制，养护施工完毕之后，持续跟进监测性能变化和运行状态，考量养护措施是否有效，归纳养护经验，以保障高压绝缘子长久稳定，电网得以安全运营。

（四）全周期老化管控的协同管理体系

全时段老化运维要想高效落实，离不开创建“多方协作，权责明晰，流程闭合”的协同运作体系，达成运维前、运维时、运营阶段老化管控工作的无缝对接和高效互动。该协同运作体系以电网运维指挥中心为关键点，融合设计单位、运维单位、检测单位、设备厂家等诸多

主体，明确各个参与方的责任与分工。设计单位承担老化预估模型的塑造以及防护方案的改良任务，给予技术支持；运维单位负责执行老化监测及动态调节举措，依照改良后的方案开展运维；检测单位承担全时段的数据收集、分析并发出警报，保证数据的准确性与可靠性；设备厂家则在运营期间跟进设备状态并提供技术服务，以维持长久的稳定状态。形成常态化的协同沟通机制，经由定时举办协同会议、搭建线上协同平台等途径，做到各方信息即时共享，并快速商讨问题。对于运维过程中产生的老化异常、技术难点等情况，召集各方一同分析，制订解决办法，防止由于信息不对称引发运维迟缓。稳固高压绝缘子的长期稳定性，改善高压电网运维项目的总体品质。

结语

高压电网运维工程当中，绝缘子材料老化检测与防护的重点在于解决由多因素耦合引发的性能衰退状况，要想达成此目标，首先要准确识别老化的诱发机理与特性，然后创建恰当的检测技术体系以及覆盖整个使用期限的老化防护体系。经由采用离线检测、在线监测以及智能预警这三种检测技术并行使用，可以有效地改善绝缘子老化诊断的精准度，缩减故障产生的几率，而全生命时段老化防护体系做到了从运维之前就预先判断、运维期间实施调控一直到运营阶段加以跟进这样一种全方位的控制，保证绝缘子的绝缘性能保持稳定。日后，伴随着新材料、新技术不断更新换代，高压绝缘子老化检测与防护技术将会向着智能化、绿色化、高效化的方向去发展，从而给高压电网运维的质量改良给予更为牢靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 孙文杰, 张磊, 毛佳乐, 等. 电力设备绝缘损伤形式及自修复材料研究进展[J]. 电工技术学报, 2022, 37(8): 2032-2043.
- [2] 黄兴溢, 等. 具有垂直面内高导热性的双链聚合物电介质[J]. 自然, 2023, 615(7950): 844-851.
- [3] 李治, 等. 第四代电力绝缘子技术成果转化项目[C]//2024天府碳中和论坛论文集. 成都: 天府永兴实验室, 2024: 1-6.