

高压电缆绝缘性能的测试与分析

王镜博 任旭飞

内蒙古电力(集团)有限责任公司薛家湾供电分公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要: 评估绝缘整体受潮、老化及贯穿性缺陷,预防击穿风险。使用数字兆欧表(5000V/10000V),非被测相及屏蔽层接地。为避免高压电缆发生机械损伤和化学腐蚀,需从材料选择、结构设计、施工规范及运维防护等多维度实施综合保护措施,交流耐压试验,适用性:橡塑绝缘电缆(如交联聚乙烯)首选20-300Hz谐振耐压。风险:直流耐压易加速交联聚乙烯老化,可能引发反向击穿。局部放电检测作用:识别绝缘内部气隙、杂质等局部缺陷,定位潜在击穿点。

关键词: 高压; 电缆绝缘性能; 测试; 分析

综合分析需结合多维度数据,如绝缘电阻、耐压特性、温度-压力关联模型及材料机械性能,以全面评估电缆寿命与风险。

1 高压电缆绝缘性能测试标准与合格范围

(1) 绝缘电阻测试标准。10kV高压电缆,长度 $\leq 500\text{m}$ 时,20°C下绝缘电阻 $\geq 400\text{M}\Omega$ (2500V兆欧表测试)。长度 $>500\text{m}$ 时,需换算为20°C单位长度值(每千米 $\geq 400\text{M}\Omega$)。35kV及以上高压电缆,20~35kV电缆:绝缘电阻 $\geq 600\text{M}\Omega$ 。110kV及以上电缆:单位长度电阻 $\geq 1000\text{M}\Omega \cdot \text{km}$ (5000V/10000V兆欧表)。通用要求,测试环境:温度20-30°C、湿度 $<80\%$,避免强电磁干扰。

(2) 耐压试验标准。橡塑绝缘电缆(如交联聚乙烯),必须采用交流耐压(20-300Hz谐振法),禁用直流耐压(易引发反向击穿)。110kV电缆交接试验电压:1.7倍相电压。护套绝缘检测,外护套试验:测量钢铠甲对地绝缘电阻,诊断护套损伤。金属护套对地绝缘:高压电缆需单独测试。

(3) 关键注意事项。吸收比与极化指数:吸收比(60秒/15秒值) ≥ 1.3 ,极化指数(10分钟/1分钟值) ≥ 2.0 ,否则提示受潮或老化。安全操作:测试前后放电 ≥ 2 分钟,高压端设专人监护。数据比对:交接试验中,耐压前后绝缘电阻值应无明显变化。补充说明,材料性能:交联聚乙烯(XLPE)绝缘需通过热老化试验(如90°C/135°C加速老化),评估长期可靠性。局部缺陷检测:局部放电测试可定位气隙、杂质等隐患(灵敏度高于常规测试)。

2 高压电缆定期进行绝缘性能测试的重要性

(1) 预防重大安全事故。击穿风险防控,检测绝缘层老化、受潮或贯穿性缺陷,避免短路击穿引发火灾或爆炸事故,发现护套破损(绝缘电阻 $<0.5\text{M}\Omega \cdot \text{km}$)或

接头放电痕迹,消除触电隐患。人员安全保障,验证防护装备绝缘有效性,防止带电作业时电击伤亡,放电操作前确认残余电荷消除,规避操作风险。

(2) 合规与责任追溯。法规强制要求,依据《电力设备预防性试验规程》,10kV电缆需年检绝缘电阻,110kV电缆需执行 $2U_{\text{sub}} > 0 < /sub > /60\text{min}$ 耐压试验,局部放电 $>10\text{pC}$ 或温差 $>2^\circ\text{C}$ 需强制停运检修。事故责任界定,测试数据(如极化指数、泄漏电流)作为事故认定的法律依据,结合红外热像与局放图谱,实现状态检修替代计划检修,数据驱动决策,减少30%以上非必要停电维护。

(3) 环保与社会责任。降低绝缘故障导致的资源浪费(如故障电缆废弃),避免泄漏电流引发电磁污染,符合绿色电网标准。

3 特殊环境下高压电缆绝缘性能测试

(1) 极低温环境测试(-25°C及以下)。界面压力与温度关联性试验,方法:在电缆终端内部加装温度/压力传感器,通过穿心变压器保持高负载电流;阶梯降温至-5°C、-15°C、-25°C等工况点,采集稳态数据。核心目标:建立“环境温度-终端界面压力”数学模型,评估界面放电风险(温度越低,界面压力越小,绝缘性能显著降低)。低温耐压试验,在极寒环境下进行20-300Hz谐振交流耐压测试,验证电缆在低温高负载下的绝缘强度。

(2) 海底电缆特殊测试,阻水性能验证,导体需采用阻水结构,通过纵向阻水试验(如GB/T 32346.1-2015),防止水分渗透导致绝缘劣化。机械-电气联合试验,模拟海底水压、弯曲张力,测试后立即测量绝缘电阻及局部放电,要求:绝缘电阻 $\geq 1000\text{M}\Omega \cdot \text{km}$ (110kV及以上);局部放电量 $\leq 10\text{pC}$ (额定电压下)。金属护套接地连续性,测试金属护套对地绝缘电阻,诊断护套破损

导致的绝缘受潮。

(3) 高湿度/腐蚀环境测试。外护套密封性检测,测量钢铠甲对地绝缘电阻(湿度 $>80\%$ 时需先局部干燥),电阻异常下降提示护套破损。盐雾腐蚀试验,对电缆终端进行盐雾喷洒,测试后交流耐压值需满足:110kV电缆 $\geq 1.36U_0$ (预防性试验标准)。

4 高压电缆绝缘性能测试仪器与工具

(1) 绝缘电阻测试仪器。高压绝缘电阻检测仪,功能:测量绝缘电阻值($1\text{M}\Omega\sim 1000\text{G}\Omega$),自动计算吸收比、极化指数。参数:电压档位:500V/1000V/2500V/5000V,连续工作: ≥ 8 小时,支持USB数据导出,应用:诊断电缆整体受潮、老化及贯穿性缺陷。绝缘子绝缘电阻测试仪,特点:专用于高压输电线路绝缘子检测,最高电压10kV。优势:双显模式(数字+模拟指针),抗干扰强,便携设计(约1kg)。

(2) 耐压试验设备。谐振式交流耐压测试仪,关键参数:电压范围:20-300Hz,最高至500kV,波形畸变率: $\leq 0.3\%$,精度1级,应用:橡塑绝缘电缆(如交联聚乙烯)的交接试验,替代危险直流耐压。绝缘耐压测试仪,功能:工频/直流高压下的绝缘强度试验,集成过压、过流多重保护。安全设计:高压放电电路自动释放残留电荷。

(3) 局部缺陷检测工具。局部放电检测系统,技术:超声波/电场感应法,灵敏度达 $\leq 10\text{pC}$ (海底电缆标准)。用途:定位绝缘内部气隙、杂质。红外热成像仪,优势:非接触式识别电缆接头过热、护套破损。

(4) 辅助工具与防护装备。护套检测工具,钢铠甲对地绝缘电阻测试仪:诊断外护套损伤。安全防护:绝缘手套/鞋:橡胶材质隔离电流;接地棒:测试前放电处理。

5 高压电缆绝缘性能测试仪器使用前校准方法

(1) 校准前准备。环境控制,温度: $20\pm 5^\circ\text{C}$ (超出范围需补偿修正);湿度: $\leq 85\%\text{RH}$,避免电磁干扰;仪器静置时间: ≥ 1 小时(温度平衡)。设备与工具,标准电阻器:覆盖 $1\text{M}\Omega\sim 1\text{G}\Omega$ 量程,精度高于待校仪器15%;屏蔽测试线:接口无氧化或松动;高压放电棒:耐压等级 $\geq$ 测试电压2倍。

(2) 绝缘电阻测试仪校准。校准步骤,预热与自检,开机预热15-30分钟,执行仪器自检功能;检查电池电量或电源稳定性(直流偏移 $\leq 0.1\%$)。阻抗校准(标准电阻法),连接:测试仪L/E端 $\rightarrow$ 标准电阻器两端;档位选择:匹配电阻值(如 $100\text{M}\Omega$ 对应1000V档);调节:若误差 $>\pm 5\%$,调节电路板“阻抗”校准旋钮(顺时针增阻值)。温度补偿校准,低温箱/高温箱中测试标

准电阻;调节“温度”校准旋钮修正漂移(逆时针减补偿)。多点验证,更换 $1\text{M}\Omega$ 、 $10\text{M}\Omega$ 、 $1\text{G}\Omega$ 电阻重复测试,全量程偏差 $\leq \pm 3\%$ 。

6 高压电缆绝缘性能测试方法

(1) 高压电缆绝缘电阻测试仪使用方法。测试前准备,安全防护,穿戴绝缘手套、护目镜及防护鞋,确认接地棒完好;切断电缆所有外部电源,对电缆三相导体及金属护套充分放电 ≥ 5 分钟。环境与设备检查,环境湿度 $\leq 85\%\text{RH}$,温度无剧烈波动;检测测试线无破损,接口无氧化(屏蔽线“G”端必须接入);仪器开机预热15分钟,电池电量 $\geq 80\%$ 。操作流程,参数设置,电压选择:按电缆额定电压选档(500V:低压电缆;2500V/5000V:中高压电缆);量程匹配:预估绝缘电阻值,选自动量程或手动档位。测试后处理。放电操作,先按“STOP”键停高压,再用接地棒对电缆放电 ≥ 3 分钟;仪器显示归零后方可拆卸测试线。数据分析,对比历史数据:电阻值下降 $>30\%$ 需预警;环境温度修正:每升高 10°C ,电阻值乘以系数1.5(基准 20°C)。关键注意事项,安全禁忌,严禁潮湿环境操作(湿度 $>85\%\text{RH}$);橡塑电缆禁用直流耐压功能,避免绝缘累积损伤。特殊场景,长电缆测试:优先选5000V高压档,抑制电容效应;护套破损诊断:金属护套对地绝缘电阻 $<0.5\text{M}\Omega$ 即判定破损。

(2) 摇表测试高压电缆绝缘的方法。测试前准备,安全防护,穿戴绝缘手套、护目镜和防护鞋,确认接地棒完好;切断电缆所有外部电源,对电缆三相导体及金属护套充分放电 ≥ 5 分钟;悬挂“禁止合闸”警示牌,防止意外通电。环境与设备检查,环境湿度 $\leq 80\%\text{RH}$ (潮湿时需用热风枪干燥电缆表面);摇表选型:10kV高压电缆选用2500V或5000V摇表(低压电缆用500V/1000V);摇表性能验证:空载测试:L/E端开路,摇动摇柄至120转/分钟,指针应指“ ∞ ”;短路测试:L/E端短接,轻摇手柄,指针应归“0”。操作步骤,单芯电缆测试L端接芯线,E端接金属护套,G端接绝缘层保护环(若有)。多芯电缆测试,逐相测量:测试A相时,将B/C相短接并与金属护套共接至E端;护套绝缘测试:金属护套对地绝缘电阻需额外测量。摇测操作,匀速摇动摇柄至120转/分钟(转速波动会导致误差);保持稳定转速1分钟,读取指针稳定值(长电缆需测10分钟计算极化指数)。数据记录,记录绝缘电阻值(单位: $\text{M}\Omega$ 或 $\text{G}\Omega$)、环境温湿度及测试时间;计算吸收比: $R_{60s}/R_{15s} \geq 1.3$ (橡塑电缆合格标准)。关键注意事项,安全禁忌,严禁未放电操作(残余电荷可击穿摇表);湿度 $>$

80%或雷雨天气禁止测试。

(3) 高压电缆绝缘性能的专业测试的方法。基础绝缘性能测试。绝缘电阻测试,目的:评估整体绝缘受潮、老化及贯穿性缺陷。方法:使用2500V/5000V兆欧表,逐相测量(非被试相接地);记录15秒、60秒值计算吸收比($R_{60}/R_{15} \geq 1.3$),10分钟值计算极化指数($R_{10min}/R_{1min} \geq 2.0$)。标准:10kV新电缆: $\geq 400M\Omega$ (500m内);110kV及以上: $> 1000M\Omega$ (20℃)。护套绝缘测试,测量金属护套对地绝缘电阻,标准值 $\geq 0.5M\Omega \cdot km$;潮湿环境需预热干燥表面。耐压试验,交流耐压试验(橡塑电缆专用),设备:20-300Hz谐振装置,波形畸变率 $\leq 0.3\%$;缺陷精准定位技术,局部放电检测,超声波/脉冲电流法检测微观气隙,灵敏度 $\leq 10pC$;红外热成像,识别接头过热、护套破损(温差 $> 2^{\circ}C$ 提示缺陷);故障点定位:电桥法:通过电容比例计算断点距离;声磁同步法:捕捉放电声波与磁场信号定位。高级诊断方法,介损测试,测量介质损耗因数($\tan\delta$),评估绝缘老化程度;频域反射法(FDR),检测绝缘含水率 $> 0.1\%$ 的区段(信号衰减3-5dB);时域反射法(TDR),纳秒级脉冲定位故障点,精度 $\pm 0.5m$ (低阻故障)。

7 高压电缆绝缘性能的维护与保养建议

(1) 定期检查与监测。外观巡检,每月检查电缆外护套是否破损、老化或腐蚀,重点排查接头/终端松动、过热或电弧痕迹。清除表面油污、尘土及覆盖物,保持通风干燥,避免绝缘层受潮或散热不良。负荷与温度监

控,实时监测运行负荷,严禁超过额定载流量(过载加速绝缘老化)。红外热成像季度扫描,接头温差 $> 2^{\circ}C$ 或局部超 $90^{\circ}C$ 需紧急处理。

(2) 绝缘性能主动维护。定期测试,绝缘电阻测试:每6个月测量一次,2500V/5000V兆欧表逐相检测,20℃时阻值低于初始值30%需检修。介损测试($\tan\delta$):年检一次, $\tan\delta$ 值异常升高(> 0.01)提示绝缘老化加剧。耐压试验,橡塑电缆每3年做交流耐压试验(如10kV电缆用21-30.5kV/5min),禁用直流耐压以防电荷积累损伤。

(3) 环境与机械防护。防潮防腐蚀,缆沟湿度控制在 $\leq 80\%$,积水需及时排水并做防水涂层;避免接触酸、碱、盐等腐蚀物,裸露部分涂防护油或加套管。机械防护,敷设时弯曲半径 $\geq 15D$ (D为电缆外径),防止内部绝缘层变形;桥架电缆加装抗震支架,地埋段设置警示标识防外力破坏。

(4) 寿命管理策略。投运15年以上的电缆,每年开展局部放电检测+频域反射法(FDR)评估含水率;绝缘严重老化(如 $\tan\delta > 0.02$)或多次故障段,优先更换交联聚乙烯(XLPE)环保型电缆。

总之,全过程防护需结合电缆选型(如优先铠装电缆)、施工规范(如避免高落差敷设)及智能运维(如热老化监测),确保电缆全生命周期安全。

参考文献

- [1]孔宏宇.高压电缆绝缘性能的测试探讨.2023.
- [2]钟浩宇.基于高压电缆绝缘性能的测试与分析.2022.