高压电缆绝缘老化状态评估与预警技术

吴建业

青岛石化检修安装公司 宁夏 银川 750411

【摘　要】：高压电缆绝缘老化受电、热、机械和潮湿环境共同影响，单项读数难以支撑预警。本文分析状态评估概况，梳理在线检测的局放介损测点、温度载流接入和特征处理，重点讨论高压电缆老化特征量与绝缘失效风险在检测结果预警评价中的局放幅值、介损增量、温升偏差和风险指数。检测结果预警评价可把分散信号转化为分级状态，为停电诊断排序和接头复测提供依据。

【关键词】：高压电缆；绝缘老化；状态评估；局部放电；风险预警

DOI:10.12417/2811-0528.26.21.060

1 高压电缆绝缘老化状态评估概况

高压交联聚乙烯电缆长期处在电场、热场、机械弯曲和潮气渗入共同作用下，绝缘层会出现电荷陷阱加深、微孔扩展和界面屏蔽能力下降。老化状态评估不能只看投运年限，而应把本体、接头、终端和金属护套回路放在同一对象中观察：本体绝缘决定耐受水平，接头界面决定局部缺陷概率，终端受潮改变局放背景，载流量与散热条件改变绝缘温度[1]。评估目标是识别绝缘性能从可接受、加速劣化到失效风险增大的连续状态。

2 高压电缆绝缘老化状态在线检测

（1）高压电缆绝缘老化检测总体方案：总体检测方案宜采用在线监测与停电诊断互补的结构。在线部分采集局部放电脉冲、护层电流、接头温度和负荷电流，捕捉界面缺陷和热负荷累积；检修窗口内的介质损耗、振荡波局放和绝缘电阻测试，用于校正在线读数[2]。检测对象按电缆段、接头组和终端分区，再按电压等级、投运年限、历史故障和敷设环境分级布点。局放、介损和温度载流关系分别反映放电活性、极化泄漏和热老化强度。

（2）局部放电和介质损耗测点布设：局部放电测点优先覆盖接头、终端和交叉互联箱，这些位置存在半导电层恢复、压接界面、应力锥和护层接地连接等不连续结构。高频电流传感器装在接地线或护层回路时，先测定背景噪声、传播衰减和反射端位置，双端检测可提高定位稳定性[3]。介质损耗测点按相别和电缆段形成整体口径，再与局放位置校核；局放升高而介损变化不明显时，多为局部气隙或界面缺陷，介损随电压或温度上升时，则说明整体极化损耗风险增大。

（3）运行温度载流传感器同步接入：温度和载流数据是评估老化速率的工况坐标。导体温度难以长期直接测量时，可在接头外表、隧道环境、排管井室和热瓶颈处布置温度传感器，并同步记录相电流、负荷持续时间和环境温度。短时峰值电流造成的温升若能恢复，主要体现热惯性；长期高负荷叠加土壤干化、通风不足或邻近热源时，绝缘层平均温度升高会加快氧化和空间电荷积累。温度加速因子 A_T 用于量化热老化放大作用，并把同一温升在轻载、重载和散热受限条件下的老化含义区分开来，避免把环境温度波动直接等同于绝缘材料劣化。温度加速因子可按式①计算。

$$A_T = exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right] \quad ①$$

式①中，A_T 为温度加速因子，单位为无量纲；E_a 为绝缘老化等效活化能，单位为 eV；k 为玻尔兹曼常数，单位为 eV/K；T_0 为基准绝缘温度，单位为 K；T 为当前绝缘温度，单位为 K。该关系把温度差写入指数项，当前温度高于基准温度时，A_T 随温差扩大而提高热老化权重，并区分短时热惯性和持续高负荷影响。

（4）在线状态特征数据采集处理：在线状态数据处理先把不同采样频率的信号对齐到同一窗口。局放脉冲按幅值、重复率、相位分布和定位距离提取特征，介质损耗按电压等级、温度区间和相别形成读数，温度载流数据按日峰值、持续时间和热恢复斜率形成热应力量。开关操作、雷电干扰、变频脉冲和通信噪声不能混入局放事件，短时过载也不能解释为绝缘劣化。三项耦合偏离量 D 用于把处理后的特征量转换成统一检测尺度。三项耦合偏离量可按式②计算。

$$D = \sqrt{\left(\frac{Q_{PD}}{Q_{lim}}\right)^2 + \left(\frac{L_d}{L_{lim}}\right)^2 + \left(\frac{T_d}{T_{lim}}\right)^2} \quad ②$$

式②中，D 为三项耦合偏离量，单位为无量纲；Q_{PD} 为局放幅值，单位为 pC；Q_{lim} 为局放预警限值，单位为 pC；L_d 为介损增量倍数，单位为无量纲；L_{lim} 为介损增量预警限值，单位为无量纲；T_d 为接头温升偏差，单位为 K；T_{lim} 为接头温升

偏差预警限值，单位为 K。该关系把局放、介损和温升放入平方和根式，单项超限可提示局部风险，多项同步升高时 D 会集中放大耦合贡献。

3 高压电缆绝缘老化检测结果预警评价

（1）高压电缆老化特征量评估结果：老化特征量评估应把局放强度、介质损耗增量、温度载流偏离和历史缺陷权重合成为分层结果。低风险段表现为局放幅值 0—50$_p$C、介损增量倍数 0—0.20、接头温升偏差 0—3K；关注段对应 50—200$_p$C、0.20—0.50 和 3—8K；预警段对应 200—500$_p$C、0.50—1 无量纲和 8—15K；严重预警段对应 500—1000$_p$C、1—2 无量纲和 15—25K[4]。与正常段上限相比，预警段起点的 200$_p$C 局放高 150$_p$C，0.50 倍介损增量高 0.30 倍，8K 温升高 5K；严重预警段 1000$_p$C 较预警段起点增加 800$_p$C，25K 较 8K 增加 17K，局放重复率 45 次/min 比 10 次/min 高 35 次/min。分级参数口径整理见表 1。

表 1 高压电缆绝缘老化状态评估参数口径

状态等级	局放幅值	介损增量	温升偏差	复测周期	处置要求
正常	0—50	0—0.20	0—3	30	巡检
轻关注	50—100	0.20—0.35	3—5	14	核噪
关注	100—200	0.35—0.50	5—8	7	加测
预警	200—500	0.50—1	8—15	1	诊断
严重	500—1000	1—2	15—25	0	隔离
疑似失效	1000—1500	2—3	25—40	0	停运

表 1 中，局放幅值、介损增量和温升偏差从正常到疑似失效逐级扩大，复测周期同步压缩，可把检测参数组织为处置等级，并为后续预警排序提供统一口径。

（2）高压电缆绝缘失效风险预警评估：绝缘失效风险预警采用分级阈值和趋势阈值并行方式。单次局放幅值越过背景上限只能说明存在可疑放电源，若定位点固定、重复率增加且介损同步扩大，才具备从关注转入预警的条件。三项耦合偏离量 D、温度加速因子 A_T 和非线性综合风险指数 R 共同完成预警计算：D 统一尺度，A_T 修正热负荷，R 比较电缆段或接头等级。当 R 接近 1 且同一接头三类指标同步恶化时，该位置应列为停电诊断和复测优先对象；若仅有单一路径短时突变，则先核对传感器接触、接地回路和外部干扰，再决定是否升级处置。非线性综合风险指数可按式③计算。

$$R = 1 - exp[-(aD+gA_T+hH)] \quad ③$$

式③中，R 为非线性综合风险指数，单位为无量纲；a 为检测偏离权重系数，单位为无量纲；D 为三项耦合偏离量，单位为无量纲；g 为温度加速权重系数，单位为无量纲；A_T 为温度加速因子，单位为无量纲；h 为历史缺陷权重系数，单位为无量纲；H 为历史缺陷因子，单位为无量纲。该关系把 D、A_T 和历史缺陷因子映射为 0—1 之间的 R，既保留温度修正，也适合比较不同接头对象的同步劣化风险。

非线性综合风险指数完成数值映射后，还要说明检测信号在现场对象中的来源关系。局放、介损、温度载流三类信号来自不同部位和工况；若融合节点同时保持相别、位置、时间窗口和处置等级一致，预警输出才具备准确可解释性，并能判断各类信号对最终预警的实际贡献关系。图 1 展示三类检测信号进入预警评价的关系。



图 1 高压电缆绝缘老化状态检测与预警关系

图 1 中，电缆剖面展示导体、XLPE 绝缘和护套层次，三路信号分别对应局放、介损和温度载流特征，并在右侧汇入风险预警。

4 结语

高压电缆绝缘老化状态评估与预警技术的关键在于把材料劣化、接头界面缺陷和运行热负荷放入同一证据链。局部放电定位活性缺陷，介质损耗反映极化和泄漏变化，温度载流数据校正热老化强度；三类指标经工况标记、噪声剔除和归一化融合后，可形成分级判断。工程应用中应结合电缆结构、敷设环境和历史缺陷记录修正参数，避免瞬时干扰或短时过载被误判为绝缘失效。

参考文献：

[1] 赵鸿飞,刘子瑜,韩卓展,等.高反光场景下高压电缆接头表面缺陷的偏振视觉检测[J].自动化与信息工程,2026,47(4):26-34.
[2] 王俊杰.高压电缆接地回路电阻带电检测技术分析[J].电力设备管理,2026,(14):28-30.
[3] 王泽勤.基于声学频谱特征的高压电缆耐压试验多类型局部放电智能检测系统[J].音视频工程与应用,2026,50(7):226-228.
[4] 雷志鹏,姜宛廷,门汝佳,等.矿用三元乙丙橡胶高压电缆绝缘老化机理及状态评估技术研究进展[J].工矿自动化,2023,49(9):167-177.