

火电厂发电机高压试验数据分析与设备状态评估

王 颖

内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要：持续的高压试验数据监测可确保变压器、开关柜、电缆等高压设备在额定参数下稳定工作，避免因绝缘失效引发火灾、爆炸等严重事故，同时减少因设备故障导致的发电损失和抢修成本，支撑电厂安全、经济、连续运行。高压试验数据是火力发电厂设备状态感知、风险评估和决策优化的基石，贯穿设备全生命周期管理，对保障电厂安全、稳定、高效运行具有不可替代的作用。

关键词：火电厂；电厂发电机；高压试验数据分析；设备状态评估

高压试验数据是火电厂设备健康管理核心依据，需综合环境、操作、设备因素动态分析，并依托智能化工具实现从被动检修到主动防护的转变。

1 火电厂发电机定子绕组直流电阻测试方法

(1) 测试前准备。状态要求，发电机需完全断电且充分放电（ ≥ 5 分钟），拆除所有外部连线（励磁回路、PT高低压侧刀闸等）。在冷态下测量，绕组表面与环境温差 $\leq \pm 3^\circ\text{C}$ 。氢冷机组需确认排氢后含氢量 $< 3\%$ 。仪器选择，优先采用直流电阻测试仪（数字微欧计）或双臂电桥（开尔文电桥），精度需达0.2级。典型设备：QJ44型双臂电桥（常规检测）或QJ42P型（快速筛查）。

(2) 测试方法及接线规范。方法1：分支直流压降法（推荐），步骤：将各并联分支串联通入直流电流（200A， \leq 分支额定电流的20%）。用高精度电位表测量接头压降，计算电阻值： $R = U/I$ 。需保持电流稳定，三相分支无法解开时可分相测量。优势：消除引线电阻误差，适用于微欧级电阻测量。方法2：双臂电桥法，步骤：电桥C1/P1端子接被测绕组首端，C2/P2接末端（四线制接线）。调整电桥平衡后读取电阻值。限制：输出电流较小（通常 $< 10\text{A}$ ），对大截面绕组灵敏度较低。方法3：电压-电流法，按电压表位置分前接法（电压表内阻/被测电阻 > 200 ）或后接法。

(3) 数据分析与判定标准。各相或各分支绕组的直流电阻，在校正了由于引线长度不同而引起的误差后，相互间差别不应超过其最小值的1.5%（水轮发电机为1%）；超出要求者，应查明原因。需要说明的是：a) 在冷态下测量，绕组表面温度与周围空气温度之差不应超过 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。b) 汽轮发电机相间（或分支间）差别及其历年的相对变化大于1%时应引起注意。c) 电阻值超出要求时，可采用定子绕组通入10%~20%额定电流（直流），用红外热像仪查找。

d) 温度换算公式： $R_2 = R_1 \times (T+t_2) / (T+t_1)$ 。

式中：

t1 ——绕组温度

T ——电阻温度常数（铜235、铝225）；

t2 ——换算温度（ 75°C 或 15°C ）；

R1 ——测量电阻值；

R2 ——换算电阻值。

e) 若出厂时直阻互差已经超标，在排除绕组存在缺陷的情况下，历次数据可不进行横向互差的比较，只需和出厂数据进行纵向比较即可。

2 火电厂发电机绝缘和直流耐压测试步骤

(1) 测试前准备。安全措施，发电机完全断电，断开PT高低压侧、励磁回路等外部连接。定子绕组三相短路接地放电 ≥ 5 分钟，充分释放残余电荷。氢冷机组需确认排氢后含氢量 $< 3\%$ ，严禁置换过程中测试。环境要求，环境湿度 $\leq 80\%$ ，绕组表面干燥清洁，必要时用无水乙醇擦拭。设备选型，绝缘电阻测试：采用2500V数字兆欧表（额定电压 $\geq 6\text{kV}$ 机组），短路电流 $\geq 3\text{mA}$ 。直流耐压：高压发生器容量 $\geq 0.1\text{A/kV}$ ，微安表精度0.5级。

(2) 绝缘电阻测试步骤。接线方法，定子绕组：兆欧表"L"端接被测相，"E"端接地（非被测相短接接地）。绝缘电阻：1) 各相或分支绝缘电阻的差值不应大于最小值的100%。2) 若在相近试验条件（温度、湿度）下，绝缘电阻值降低到历年正常值的1/3以下时，应查明原因。

(3) 直流耐压与泄漏电流测试步骤。试验时，微安表应接在高压侧，并对出线套管表面加以屏蔽。非被试相及外壳接地。水内冷发电机汇水管有绝缘者，应采用低压屏蔽法接线；汇水管直接接地者，按制造厂的规定执行。氢冷发电机应在充氢后氢纯度为96%以上或充氢前、排氢后含氢量在3%以下时进行，严禁在置换过程中进行试验。试验电压按每级0.5Un分阶段升高，每阶段停

留1min。在规定试验电压下，各相泄漏电流的差别不应大于最小值的100%；最大泄漏电流在20 μ A以下者（水内冷定子绕组在50 μ A以下者），根据绝缘电阻值和交流耐压试验结果综合判断为良好时，各相间差值可不考虑。

3 火电厂发电机 RSO 测试

在隐极同步发电机转子匝间短路故障诊断中，RSO是指重复脉冲法（Recurrent Surge Oscilloscope）。试验应符合下列条件：（1）根据交接和检修的不同阶段，可在转子处于膛外、膛内或不同转速下进行；（2）试验时，应断开转子接地保护的保险，并断开转子绕组与励磁系统的电气连接；（3）宜在机组交接时，留取无匝间短路状态下的初始波形。试验应采用下列设备：a) 重复脉冲发生器；b) 数据采集与示波装置：数据采集与示波装置的采样率不宜小于20MS/s，使用更高采样率的采集系统有利于提高转子匝间短路的诊断精度。应通过转子滑环或导电螺栓，从转子正负极同时或分别注入脉冲信号。对正负极的响应信号进行录波，并得到两极响应信号的差值。故障判断应符合下列原则：a) 两极的响应出现明显差值，则判断转子绕组存在匝间短路b) 在旋转状态下通过碳刷注入脉冲时，在波形起始段的起伏不应误判为存在匝间短路。c) 诊断灵敏度与绕组距脉冲注入点的距离有关，距离越近灵敏度越高。d) 重复脉冲法不应用于判别两极中点位置的匝间短路。

4 火电厂发电机励磁母排测试项目

（1）外观与机械完整性测试。母排外观检查，检查表面无变形、锈蚀、放电痕迹，螺栓紧固无松动（力矩值符合厂家要求）。绝缘支撑件无裂纹、碳化，间距均匀（偏差 $\leq \pm 2\text{mm}$ ）。连接点状态评估，采用红外热像仪检测运行中接头温升（相间温差 $\leq 15^\circ\text{C}$ 为正常）。解体检查接触面氧化及磨损（接触电阻 \leq 同截面导体的1.5倍）。

（2）电气性能测试。绝缘电阻测试，方法：2500V兆欧表测量母排对地绝缘（非被测相短接接地）。标准：常温下 $\geq 10\text{M}\Omega$ （环氧树脂绝缘）或 $\geq 100\text{M}\Omega$ （复合绝缘）；极化指数 ≥ 2.0 （环氧树脂绝缘）。直流电阻测量，采用双臂电桥（QJ44型）或微欧计测量分段电阻值。标准：相间差值 \leq 最小值5%，与历史值偏差 $\leq 3\%$ （换算至20 $^\circ\text{C}$ ）。

（3）功能验证测试。小电流通流试验，通过6kV厂用电注入电流（ $\leq 20\%$ 额定电流），检测母排电压降及温升。要求：电压分布均匀性偏差 $\leq 5\%$ ，无局部过热点。保护回路联动测试，模拟熔丝熔断、风机故障信号，验证母排监视回路报警及保护动作正确性。

（4）接地与安全测试。接地电阻测试，采用三极法

测量母排接地网电阻，独立接地网 $\leq 4\Omega$ ，共用接地网 $\leq 0.5\Omega$ 。

（5）抗干扰能力验证火电厂发电机高压试验数据分析方法。基础参数分析。绝缘电阻与吸收特性，吸收比（R60/R1）：环氧粉云母绝缘需 ≥ 1.6 ；若 < 1.3 则判定绝缘受潮，需热风干燥处理。极化指数（R600/R60）：标准要求 ≥ 2.0 ，若降至2.0以下且绝缘电阻值低于（额定电压kV+1）M Ω ，提示绝缘老化。泄漏电流诊断，相间偏差：泄漏电流相间差值 $>$ 最小值的100%为异常（20 μ A以下可忽略）；电压-电流曲线：若2.0Un时电流较1.5Un陡增 $> 30\%$ ，表明存在气隙放电或裂纹；电流随时间持续增长则提示绝缘劣化加速。定位技术：采用时差法定位误差 $\leq 0.5\text{m}$ ，结合行波反射确定放电点坐标。

5 火电厂发电机设备状态的评估

（1）评估依据与标准。国家标准与技术规范，遵循《发电设备可靠性评价规程》（DL/T 793.1-2017），定义设备可靠性为“在规定条件下完成规定功能的能力”，要求通过全国统一信息系统实时采集运行数据。GB/T 43188-2023发电设备状态评价导则明确了部件劣化程度的分级标准（如绝缘性能、机械损耗等），并规定了整体评价方法。企业内部制度，火电厂需制定《设备健康状况评估制度》，明确评估原则、组织架构（如评估领导小组+专业小组）及职责分工，确保评估的科学性和闭环管理。

（2）评估内容与方法。核心评估维度，运行参数：实时监测温度、压力、振动、电流等关键指标，分析数据变化趋势。结构完整性：通过无损探伤（如锅炉受热面）、振动监测（如汽轮机叶片）检测腐蚀、裂纹等隐患。性能指标：重点评价供电煤耗、发电厂用电率、出力效率等经济性参数。故障历史与维护记录：统计故障频次、类型及检修效果，识别重复性缺陷。关键技术手段，日常巡检：运行人员每2小时记录设备外观及参数，发现异常即时上报。专业检测：定期开展绝缘试验、气密性检测（如定子绕组漏水检查）及预防性试验。综合诊断：结合历史数据、实时监测与专家分析，预判设备寿命及故障风险。

（3）评估结果应用。优化运行与维护策略，根据评估结果调整运行参数（如主汽温、给水温度），提升能效水平（如大唐鲁北公司通过优化供电煤耗获全国5A级机组评价）。制定差异化检修计划：对高风险设备实施状态检修，低风险设备延长检修周期（如某电厂将C级检修间隔延长至21个月）。故障预防与技术改造，针对频发故障（如转子绕组匝间短路、端部线圈相间短路），

强化绝缘工艺及湿度控制。对先天缺陷设备进行改造升级，例如更换低效部件或引入智能监测系统。

(4) 行业发展趋势。数据驱动决策：依托物联网技术构建设备健康数据库，支持预测性维护（如某电厂实现712天长周期运行）。标准体系完善：国家持续更新评价标准，推动评估流程标准化。

6 火电厂发电机设备维护或更换的建议

(1) 基于当前技术标准与行业实践的火电厂发电机设备维护及更换建议，综合设备状态、经济性与政策导向制定：关键部件维护要点。绝缘系统：极化指数 < 2.0 或年降幅 $> 30\%$ 时，需进行局部浸漆修复；局部放电量 $> 100\text{pC}$ 且年增幅 $> 50\%$ 的定子线棒优先更换。冷却系统：氢冷机组纯度维持 $\geq 96\%$ ，密封油压差控制 $(0.03\sim 0.08\text{MPa})$ ；水冷系统管路年腐蚀速率 $> 0.2\text{mm}$ 需化学清洗或更换。政策性更新要求。强制淘汰：服役超25年且供电煤耗 $> 310\text{g/kWh}$ 的机组需限期关停；技术改造：2024年起推动“三改联动”（节能改造+供热改造+灵活性改造），更换低效给水泵/风机等辅机。通过分级维护与量化更换标准，可降低非计划停运率至 $< 1\%$ /年，同时适配国家能源设备更新政策导向。

(2) 火电厂发电机高压试验风险防范对策。试验前风险控制。环境与设备核查，试验区域湿度需 $\leq 65\%$ ，环境温度 $5\sim 40\text{℃}$ ，避免凝露导致放电风险。设备双重接地：试验设备外壳与接地网可靠连接，接地电阻 $\leq 0.5\Omega$ ；被试设备断开外部连线后独立接地。氢冷机组试验前需检测氢气纯度 $\geq 96\%$ ，含氢量 $< 3\%$ ，防止氢气爆炸。人员与流程规范，执行双监护制度：试验负责人指挥操作，专职安全员监督防护措施（绝缘垫、遮栏、警示牌）。试验方案预演：明确加压步骤、安全距离（如 110kV 试验 $\geq 1.5\text{m}$ ），异常中断流程。应急处置机制。后备防护，试验区域配置应急呼吸装置（防毒面具）、带压缩空气的呼吸防护设备。高压引线装设防爆导流罩，限制电弧扩散范围。通过分级防控与冗余防护设计，可降低高压试验事故率 $> 80\%$ 。需特别注意：环氧树脂绝缘设备试验后需静置24小时，避免残余电荷累积引发二次事故。在励磁柜投运状态下，监测母排感应电压（要求 $\leq 36\text{V AC}$ ）。

7 火电厂发电机过电压事故防范措施

(1) 技术防护措施。避雷器应用，在发电机出口、变压器高压侧等关键节点安装氧化锌避雷器（MOA），限制雷电侵入波和操作过电压幅值，确保残压低于设备绝缘耐受水平。避雷器接地电阻需 $\leq 0.5\Omega$ ，并与设备接地网可靠连接，避免反击过电压。过电压保护装置，配置转子过电压保护装置（如非线性电阻），防止转子匝间短路或异步运行产生的感应过电压。对氢冷机组增设防爆型保护器，避免氢气环境放电风险。断路器改进，采用带并联电阻的SF6断路器，抑制切空载线路过电压；优化分合闸相位控制，减少操作过电压幅值。

(2) 系统设计与参数优化。中性点接地方式，发电机中性点经消弧线圈或高阻接地，限制单相接地故障引发的弧光过电压。参数匹配与谐振抑制，避免电感-电容参数谐振：加装阻尼电阻或滤波器，破坏谐振条件。空载线路配置并联电抗器，补偿电容效应引起的工频电压升高。绝缘配合设计，关键设备绝缘水平需高于避雷器残压20%裕度，环氧树脂设备额外增设防电晕措施。

(3) 运行监测与应急处置。实时监测预警，部署在线局部放电检测仪（精度 $\pm 0.5\text{m}$ ），捕捉 $> 100\text{pC}$ 的放电脉冲；超宽频 $\tan \delta$ 监测（ $1\text{mHz}\sim 1\text{kHz}$ ）预警绝缘劣化。氢冷机组氢气纯度实时监测，纯度 $< 96\%$ 时自动启动补氢程序。运维管理规范，操作防护：断路器操作前模拟预演，合闸相位控制误差 $< 1\text{ms}$ ；切空线前投切并联电抗器。防火配合：过电压敏感区域（如电缆夹层）采用A类耐火电缆，配置 CO_2 灭火器及压缩空气呼吸装置。每季度开展政企联合应急演练，重点检验设备隔离时效（目标 ≤ 3 分钟）。

总之，建立试验数据库，关联环境参数与设备状态数据，支持趋势分析与故障预警；采用实时监测系统（如紫外成像+超声波联合检测）提升局部放电分析的时效性。

参考文献

- [1]张萍.关于电厂发电机高压试验数据分析与设备状态评估.2022.
- [2]王晓丽.电厂发电机高压试验数据分析与设备状态评估分析.2023.