

电力系统中发电厂直流系统接地故障分析与处理

张紫薇

(华电福新广州能源有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 发电厂直流系统为控制、保护及应急设备提供稳定电源, 其接地故障可能引发设备误动作、机组停运等严重后果。针对发电厂环境特点, 分析直流系统单点接地、多点接地等故障类型, 探讨便携式巡检仪、绝缘监测装置等实用检测方法, 并提出分级排查、设备改造等处理措施, 为发电厂运维人员提供接地故障防控参考。

关键词: 发电厂; 直流系统; 接地故障; 绝缘监测; 故障排查

Analysis and treatment of grounding fault in DC system of power plant in power system

ZHANG Ziwei

(Huadian Fuxin Guangzhou Energy Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: The DC system of power plants provides stable power supply for control, protection, and emergency equipment. Grounding faults may cause serious consequences such as equipment misoperation and unit shutdown. Focuses on the environmental characteristics of power plants, analyzes the types of faults such as single point grounding and multi-point grounding in DC systems, explores practical detection methods such as portable inspection instruments and insulation monitoring devices, and proposes measures such as graded troubleshooting and equipment modification to provide reference for grounding fault prevention and control for power plant operation and maintenance personnel.

Keywords: power plant; DC system; grounding fault; insulation monitoring; troubleshooting

0 引言

发电厂直流系统涵盖机组控制电源、继电保护装置、事故照明等重要负荷。由于厂内电缆密集且环境潮湿, 直流系统绝缘下降导致接地故障频发。此类故障初期无明显征兆, 但可能引发保护误动作、蓄电池短路过载等连锁反应, 严重影响发电机组安全运行。本文结合发电厂实际运维需求, 系统阐述接地故障的识别与处置方法。

1 发电厂直流系统接地故障类型

1.1 单点金属性接地

单点金属性接地指直流系统的正极或负极直接与接地网形成低阻连接, 导致系统对地电压异常偏移。在发电厂环境中, 此类故障常见于蓄电池组、充电机输出端等关键部位。例如, 蓄电池正极引线绝缘层因长期受酸雾腐蚀而破损, 裸露铜芯接触到金属支架时, 负极对地电压会从正常

值110 V（220 V系统）骤升至220 V。此时，电子设备（如PLC模块、继电保护装置）的信号输入端承受过电压，可能造成电路板烧毁或误发跳闸指令。

故障高发区域包括电缆转弯处、穿墙套管位置及端子排连接点。电缆沟内积水浸泡，使橡胶绝缘层水解脆化；行车碾压或检修工具刮蹭，易造成机械损伤。端子排螺钉松动，导致接触面氧化，电阻增大发热后，进一步加剧绝缘劣化。排查时，可使用万用表测量各支路对地电压，正常状态下，正负极对地电压之和应等于系统标称电压，若某极电压接近零，则提示该极存在接地。处理时，需先转移负荷，用绝缘胶带临时包裹破损点，随后更换整段电缆或清理氧化端子并涂抹凡士林防锈^[1]。

1.2 多点非金属性接地

多点非金属性接地表现为两个及以上接地点通过高阻抗路径形成泄漏回路，常见于电缆密集敷设区域。发电厂电缆沟内湿度常年高于70%，电缆外皮受潮后表面形成导电水膜，当多根电缆同时存在绝缘缺陷时，正负极通过水膜-大地构成并联回路。此时直流系统虽能维持运行，但泄漏电流持续流经接地网，加速电缆主绝缘碳化。例如，某厂汽机直流油泵电缆与照明回路电缆并行敷设，二者绝缘破损点间距仅1.2 m，潮湿环境下形成约15 k Ω 的接地通路，三个月后油泵电缆发生相间短路。

此类故障隐蔽性强，常规绝缘监测装置可能无法及时报警。检测时需采用分阶加压法，断开所有负荷后，用500 V绝缘电阻表逐段测量电缆绝缘。先测整条回路对地电阻，若低于50 k Ω ，则在中部解开触头分别测量前后半段，逐步缩小范围。处理措施包括：清理电缆沟积水；加装强制通风除湿设备；对绝缘电阻低于10 k Ω 的电缆整体更换。日常维护中应避免不同电压等级电缆混放，动力电缆与控制电缆分层敷设间距应不小于30 cm。

1.3 间歇性接地

间歇性接地因机械振动或环境参数波动引发，故障状态时断时续。发电厂内典型场景包括：汽轮机基座振动导致控制柜端子排螺钉松脱，电缆芯线周期性触碰柜体；昼夜温差使户外端子箱内产生凝露，日出后水分蒸发使绝缘暂时恢复。某燃机电厂曾出现每天凌晨02:00—05:00直流接地告警，经查为夜间低温使柴油发电机启动控制电缆结露，绝缘电阻降至8 k Ω ，白天升温后恢复至50 k Ω 以上^[2]。

此类故障排查需结合环境监测与历史数据分析。运维人员应记录告警发生时的温湿度和设备运行状态，使用带数据存储功能的绝缘监测装置捕捉瞬时接地波形。定位时可对疑似支路进行人工振动试验：用绝缘棒轻敲电缆桥架，观察绝缘电阻是否波动。处理措施包括：加装防振胶垫；改用弹簧接线端子；户外箱体内部敷设电加热膜并设置自动除湿装置。对于频繁振动的区域，采用柔性防火电缆替代刚性电缆，减少机械应力对绝缘层的损伤。

2 接地故障检测方法

2.1 便携式绝缘巡检仪检测

便携式绝缘巡检仪是发电厂日常巡检的核心工具，适用于快速筛查接地故障。检测前，需将直流系统切换至双极浮空状态，断开充电机与蓄电池连接，确保系统完全脱离接地。操作时，选用量程0~500 k Ω 的绝缘电阻测试仪，红表笔接被测支路正极，黑表笔接接地网，保持测试电压250 V持续60 s。若绝缘电阻值低于25 k Ω ，该支路存在高概率接地风险^[3]。

对于密集电缆桥架区域，可采用钳形漏电流检测法。将钳形表卡在支路负极电缆上，系统浮空后泄漏电流超过2 mA即判定异常。检测过程中需注意：①测试前关闭支路负荷，避免电子设备内滤波电容影响读数；②多分支并联回路需逐条断开测量，防止相邻回路干扰；③高温高湿环境下，检测值需进行温湿度补偿校正，通常

温度每升高10℃或湿度每增加20%，绝缘电阻允许下降15%。此方法优势在于设备轻便、成本低，但受人工操作效率限制，难以覆盖全厂所有支路。

2.2 在线绝缘监测装置

在线监测装置通过平衡桥电路实现实时监控，在发电厂主控室直流屏内安装。平衡桥由两个阻值相等的电阻（ R_1 、 R_2 ）串联组成，中性点接入电压表监测对地电压。正常运行时，正负母线对地电压对称，约为系统电压的1/2（如220 V系统为+110 V/-110 V）。当正极接地时， R_1 两端电压降为零，负极对地电压升至220 V，装置触发声光报警并记录事件时标。

高级型号配备支路巡检功能，采用低频信号扫描技术。向母线注入0.5 Hz方波信号，通过检测各支路电流相位差锁定故障回路，定位误差不超过5 m。安装时需注意：①平衡桥电阻精度需达±1%，避免因自身偏差导致误判断；②监测装置接地线必须单独引至主接地网，与动力设备接地点间距大于3 m；③每周进行装置自检，通过模拟接地试验验证报警灵敏度。此方法可实现24 h无人值守监测，但对高阻接地（>50 kΩ）响应延迟，需结合其他手段进行补充检测。

2.3 暂态信号注入法

暂态信号注入法专为定位高阻接地设计，尤其适用于发电厂电缆沟、穿线管等隐蔽区域。操作时，将信号发生器接入直流母线，输出1~10 kHz正弦波信号，幅值控制在系统电压的5%以内（如220 V系统注入11 V）。手持接收器沿电缆路径探测，当靠近故障点时，电磁场强度骤增，耳机内蜂鸣声频率加快。

实际应用中需注意：①注入信号前断开系统所有电子设备，防止高频干扰导致保护误动作；②对同沟敷设的多根电缆，采用分时逐条通电法排除干扰；③金属屏蔽层接地的电缆需在故障点上游解开屏蔽层接地线，避免信号旁路。该方法最大优势在于无须进行停电检测，对运行中系统影响小。某案例中，发电厂直流系统存在120 kΩ高阻接地，传

统方法无法定位，采用30 kHz信号注入后，在汽机平台电缆夹层内精准找到绝缘破损点。

3 直流系统接地故障检测方案

3.1 直流系统接地检测方案

对直流系统而言，判断接地支路游离的依据为各支路的接地电阻值。通常情况下，当支路的接地电阻值小于20 kΩ时，认为这一支路发生接地。如果可以准确计算各支路的接地电阻值，便能够准确判断接地支路。但是受支路对地电容等因素影响，难以确保检测准确度。本文针对非环网支路，同样将支路接地电阻值作为判断接地的依据，使用基于小波分析的信号处理分析方法，通过算法计算支路接地电阻值。在环网支路检测方面，运用小波分形技术，获取信号低频段成分的分形维数，并分析支路接地情况。直流系统接地故障检测的总体方案如下图所示。

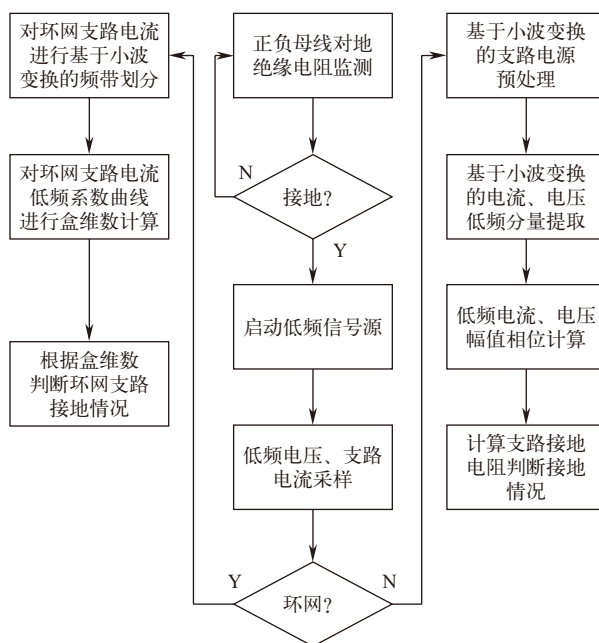


图 直流系统接地故障检测总体方案

Fig. Overall scheme for grounding fault detection of DC system

3.2 对地绝缘电阻的监测

正负母线对地等效电阻的监测是直流系统接地故障检测的重要基础。目前，平衡电桥在发电厂、变电站中较为常用，是一种直流绝缘监视装

置。本文使用一种双不对称电桥，直流系统正负母线总的对地等效电阻分别为 R_z 、 R_f ，桥电阻分别为 R_1 、 R_2 和 R_j ，正负母线间电压为 U ， R_j 的电压为 U_j ，当K连接至一端时，可获取等效电路，公式为

$$R = R_1 \parallel R_2 + R_z \parallel R_f \quad (1)$$

$$E_\Sigma = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_f}{R_z + R_f} \right) U \quad (2)$$

$$U_{j1} = \frac{E_\Sigma}{R_\Sigma + R_j} R_j = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_f}{R_z + R_f}}{R_1 \parallel R_2 + R_z \parallel R_f + R_j} UR_j \quad (3)$$

当K连接至两端时，可得

$$U_{j2} = \frac{E_\Sigma}{R_\Sigma + R_j} R_j = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_f}{R_z + R_f}}{R_1 \parallel R_2 + R_z \parallel R_f + R_j} UR_j \quad (4)$$

式（4）减式（3）可得

$$U_{j1} - U_{j2} = \frac{\frac{R_2 - R_1}{R_1 + R_2}}{R_1 \parallel R_2 + R_z \parallel R_f + R_j} UR_j \quad (5)$$

$$R_z \parallel R_f = \frac{UR_j(R_2 - R_1)}{U_{j1} - U_{j2}(R_1 + R_2)} - R_1 \parallel R_2 - R_j \quad (6)$$

式中， U 为正负母线间的电压，分别采样正、负母线对地电压值 U^+ 和 U^- ，之后根据公式计算得到； $R_z \parallel R_f$ 体现直流系统对地绝缘情况，通过采样 U_{j1} 和 U_{j2} ，用式（6）定量计算直流系统对地绝缘电阻值。当直流系统支路出现正极接地时，正母线对地电压明显下降；当出现负极接地时，负母线对地电压下降，因此，通过实时监测正负母线的对地电压值，能够有效判断接地极。

4 典型接地故障处理流程

4.1 一级排查：主干回路隔离

一级排查的核心是快速缩小故障范围至具体母线区段。操作时，首先佩戴绝缘手套，使用验电器确认母线带电状态。断开直流母线分段开关前，需通知运行人员做好负荷转移准备，避免保

护装置失电引发误动作。以220 V系统为例，若I段母线接地，断开分段开关后，立即观察绝缘监测装置：若II段母线电压恢复正常，则故障锁定在I段；若两段仍异常，说明充电机或蓄电池本体接地。

重点排查充电机输出端时，需用万用表测量正负极对地电压。正常时，两极对地电压差不大于20 V，若某极电压接近零，则其输出电缆可能存在破损。蓄电池组检查需逐节测量单体电压，正常浮动范围在2.18~2.25 V之间，若某节电压异常偏低（如1.8 V），可能提示内部短路接地。处理过程中，若发现端子排锈蚀，先用细砂纸打磨接触面，涂抹导电膏后复紧螺栓，并控制合适的扭矩^[4]。对于暂时无法隔离的故障母线，可临时接入移动式直流电源车，保障关键控制回路供电。

4.2 二级排查：分支回路定位

二级排查需按“先非生产、后生产”原则分级停电。优先断开事故照明、检修插座等非核心负荷，其次停运通风空调、电动阀门等辅助设备，最后处理继电保护、自动控制等重要回路。每断开一条支路，需等待2 min，使系统电容放电完毕，观察绝缘监测装置电压变化。若断开某支路后正负极对地电压恢复平衡（如+110 V/-110 V），则判定该支路接地。

对疑似故障支路，使用数字万用表测量对地电阻。选择20 kΩ量程档，红表笔接支路正极，黑表笔接接地网。若阻值低于5 kΩ，基本可确认金属性接地；若阻值在5~25 kΩ间，提示非金属接地。对于多分支并联的复杂回路（如集散式控制系统），需在配电箱内逐条拆除熔断器进行测试。若支路带有电子设备，需在测试前断开电源，防止表笔电压冲击损坏元件。当发现高阻接地时，做好标记并转入三级排查。

4.3 三级排查：故障点精确定位

三级排查要求“眼到、手到、仪器到”。打开配电箱后，首先目视检查：①电缆头有无碳化痕迹；②端子排螺钉是否松动；③绝缘护套是否

存在龟裂。对隐蔽部位使用热成像仪扫描，重点关注温度较周围高 2°C 以上的点，通常为接触不良或泄漏电流发热所致。湿度检测时，箱体内部相对湿度大于75%需记录为高风险点。

分段拆线法操作步骤：①在支路中性点解开电缆触头，分别测量前后段对地电阻；②锁定接地段后，在该段1/2处再次拆解测试；③重复至故障点缩小至3 m内。对穿管电缆，采用音频定位法。在电缆首端注入1 kHz信号，手持接收器沿管道走向探测，信号突变点即为破损位置。找到接地点后，若为轻微绝缘破损，可缠绕3层自融胶带+2层高压绝缘带修复；若导体裸露超过5 mm，必须更换整段电缆。处理完成后，用2 500 V绝缘电阻表复测绝缘电阻不小于 $50\text{ M}\Omega$ 方可恢复送电。

4.4 案例分析

以某发电厂直流接地故障处理为例，故障处理期间，测得破损点接触电阻仅 $0.8\ \Omega$ ，接地电流达275 A。热成像显示故障端子温度达 78°C ，较环境温度升高 52°C 。更换电缆后，回路绝缘电阻从 $0.2\text{ M}\Omega$ 恢复至 $2.3\text{ M}\Omega$ ，泄漏电流降至 0.5 mA 以下。故障处理效果对比见下表。

表 直流系统接地故障处理效果对比

Tab. Comparison of grounding fault handling effects in DC systems

指标项	改造前数据	改造后数据	测试条件
绝缘电阻/ $\text{M}\Omega$	0.2	2.3	2 500 V/60 s 测量
故障定位时间	4 h	15 min	相同工况对比
电缆每年更换数量/根	12	3	年度统计
振动幅度/ (mm/s^2)	0.15	0.04	汽轮机平台实测值
环境湿度(%RH)	85	55	电缆沟均值
每季度误动次数	3	0	保护装置记录

5 预防性维护策略

5.1 环境湿度控制

发电厂内电缆沟、蓄电池室等区域的湿度控制是预防接地的核心措施。电缆沟除湿需采

用分区分级管理：主沟安装工业除湿机（如每日除湿量不小于50 L）；支沟配置小型转轮除湿机，湿度传感器布设间距不超过20 m。除湿机排水管应坡向集水井（坡度不小于3%），防止倒灌。沟盖板接缝处先用聚氨酯发泡胶填充，外层覆盖丁基橡胶防水胶泥，胶泥厚度不小于5 mm，每半年检查一次密封性。蓄电池室除湿需与通风联动，当湿度大于65%时，自动启动排风扇；当湿度小于50%时关闭。蓄电池架采用玻璃钢材质，支架与地面绝缘电阻不小于 $10\text{ M}\Omega$ ，底座加装橡胶垫片隔离潮气。对汽机房、锅炉房等高温区域，电缆穿墙孔洞用防火泥封堵后，表面涂刷两遍环氧树脂防水涂层，防止蒸汽渗入。

5.2 周期性绝缘检测

建立三级绝缘检测体系：①班组级，每月用2 500 V绝缘电阻表测量直流母线对地绝缘，测试前断开所有负荷，正负极分别对地加压60 s，阻值不小于 $0.5\text{ M}\Omega$ 为合格；②车间级，每季度使用1 000 V绝缘电阻表检测分支回路，重点测试汽轮机控制柜、励磁柜等振动区域电缆，同一回路三次测量差值大于15%需复检；③厂级，年度全厂直流系统绝缘普查，采用步进电压法（ $0.5\text{ kV}/\text{级}$ ）评估绝缘劣化趋势。检测数据录入管理信息系统，自动生成折线图与柱状对比图。当某支路年度阻值下降超10%，或绝对值低于 $0.3\text{ M}\Omega$ 时，启动预防性更换程序。对老化电缆采用局部加强措施，在绝缘薄弱段缠绕自固化硅橡胶带，外层套热缩管烘烤密封。

5.3 设备升级改造

电缆选型方面，将普通PVC电缆更换为交联聚乙烯绝缘型，其耐温从 70°C 提升至 90°C ，抗弯折次数增加3倍。机组保护电源采用双层绝缘结构：内层XLPE+外层氟塑料，中间夹金属屏蔽网并单端接地。端子排升级为镀银铜材质，接触电阻降低40%，配套使用力矩螺丝刀防止过紧损伤螺纹。连接处加装硅橡胶防护套，套内填充导热硅脂，既防水又散热。冗余供电改造中，在重

要回路（如数字电液控制系统）增设ATS自动切换柜，主路接地时，监测装置在0.5 s内切断故障线路，同时闭合备用回路接触器。切换过程采用磁保持继电器，避免线圈长期带电发热。改造后单极接地故障处理时间从4 h缩短至15 min，大幅降低机组非停风险。

6 案例分析

以某发电厂直流接地故障处理为例。2023年7月，某发电厂运行人员发现直流系统绝缘监测装置频繁告警，显示负极对地电压降至接近0 V，正极对地电压升至220 V。初步判断为单点金属性接地故障。

6.1 排查过程

一级排查中，断开直流母线分段开关后，确认故障位于1号机组控制母线。二级排查时，依次切断继电保护屏、调速器控制电源等支路，发现断开励磁系统控制电源后绝缘电压恢复正常。三级排查锁定该支路后，运维人员使用热成像仪扫描励磁柜接线端子，发现端子排温度较周围高3.5℃。拆开柜体发现，电缆屏蔽层因长期振动与金属柜体摩擦破损，铜芯直接搭接在接地螺栓上。

6.2 处理措施

剥离破损电缆段，重新压接OT端子并加装波纹管防护；对同批敷设的12根电缆全面检查，更换3处绝缘老化线缆；在励磁柜内加装橡胶减振垫，消除机械振动影响。

6.3 后续改进

发电厂通过将原PVC电缆更换为耐弯折的TPE绝缘电缆，在电缆沟加装支架固定间距由1 m缩短至0.6 m。三个月后复查，直流系统绝缘电阻从0.2 MΩ提升至2.3 MΩ，未再发生类似故障。

7 结束语

发电厂直流系统接地故障防控需坚持“早发现、快处理、重预防”原则。通过分级排查缩小故障范围，结合热成像等工具精准定位，并加强环境治理与设备改造，可显著降低故障发生率。运维人员应定期开展模拟接地演练，提升应急处置能力，确保发电机组安全稳定运行。

参考文献

- [1] 陈文瑞. 发电厂直流系统接地故障分析与处理[J]. 中国高新科技, 2023(22): 27-29.
- [2] 陈小峰. 发电厂直流系统接地故障的处理措施分析[J]. 电气技术与经济, 2024(9): 348-350.
- [3] 杨雪涛. 火力发电厂直流系统接地故障分析及处理[J]. 建筑工程技术与设计, 2020(21): 4490.
- [4] 张齐岳. 浅析变电站、发电厂直流系统接地故障及查找方法[J]. 城镇建设, 2019(7): 286.

作者简介

张紫薇（1994—），女，工程师，研究方向为电气工程及其自动化。

（收稿日期：2025-03-18）