

变电站直流系统接地故障查找方法研究

姚德林

国网西藏电力有限公司超高压分公司 西藏 拉萨 850000

【摘要】：变电站直流系统承担保护、控制、信号及事故照明等关键负荷，其接地故障隐蔽性强且易引发二次设备误动或拒动。直流母线馈线结构、绝缘电阻下降形态及接地信号判别依据构成故障分析的基础。对比分段停电支路拉合法、低频信号注入法及在线绝缘监测定位法的适用条件与限制后表明：查找应优先完成母线与支路边界核对，依据信号幅值、相位稳定性及负荷重要性选择路径；馈线繁多、重要负荷集中的站点，宜采用在线监测与带电定位技术以减少无效试拉，实现不停电或少停电条件下的高效排查。

【关键词】：变电站；直流系统；接地故障；低频信号注入；绝缘监测

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.027

引言

变电站直流母线一端连接蓄电池组和充电装置，另一端分配到保护、控制、通信和事故照明回路，因此，任意支路绝缘性能的下降都将直接改变二次回路的安全运行边界。单点接地初期虽不形成明显短路电流，但会造成正、负母线对地电压偏移；若另一极绝缘持续恶化或发生端子误碰，将迅速放大保护误动、拒动及控制电源中断的风险。因此，接地点查找不应以告警复归为唯一目标，而需在不停电、少停电与结果可复核之间寻求平衡。拉合法、低频信号注入法及在线定位装置的适用性，必须结合支路规模与负荷等级综合判断。

1 变电站直流系统接地故障的基本特征

1.1 直流母线馈线接线结构特征

变电站直流系统通常以蓄电池组、充电装置、直流母线、馈线屏和分支负荷构成连续供电网络，控制、保护、信号、事故照明等负荷在同一母线体系内取得电源。当正、负母线对地处于悬浮状态时，单点接地不会立即产生大短路电流，但会改变母线对地电位及支路漏电流分布；若另一极随后出现绝缘薄弱点，保护回路、跳闸线圈及测控装置将面临异常电压应力，直流系统的隐蔽风险由此从单一告警演变为误动或拒动隐患。馈线结构越复杂，接地点查找越依赖对母线、环网、备用回路和临时负荷的边界识别^[1]。老旧变电站经改扩建后，常出现同屏多负荷、跨屏转接、备用芯线带电及二次电缆受潮并存的现象，若馈线名称与现场实际走向不一致，仅凭屏柜编号拉合支路，极易遗漏末端端子箱、机构箱及通信电源接口。查找前厘清母线分段、充电机出口和馈线熔断器位置，可以把故障范围压缩到可验证的供电路径内。

1.2 正负母线绝缘电阻下降形态特征

接地故障的初期表现往往并非开关跳闸，而是正负母线对地电压偏移、绝缘监察装置报警、支路漏电流上升或潮湿天气下告警反复出现。正极接地时负极对地电压可能升高，负极接地时正极对地电压可能升高；而当两极绝缘同时下降时，母线

电压偏移反而不显著，若单纯依赖电压法将低估故障波及范围。绝缘电阻的下降形态需结合极性、电缆长度、对地电容和负荷投入状态判断，不宜将单次告警数值直接等同于唯一接地点^[2]。现场查找中最易混淆的是金属性接地、经电阻接地及分布电容耦合所致的虚假信号。金属性接地时母线电压偏移稳定，支路检测响应集中；经电阻接地则随温度、湿度及负荷状态变化，绝缘值可能在告警阈值附近波动；对于长电缆或并列敷设场景，低频检测信号易受对地电容影响，邻近支路出现弱响应。区分上述形态，是选择拉合法、信号注入法或在线定位法的基础前提。

1.3 接地信号幅值判别技术特征

接地信号判别的技术基础在于将母线绝缘变化转化为可采集的电压、电流、相位或脉冲响应。不平衡电桥法适用于判断母线整体绝缘水平，低频信号注入法适用于不停电条件下沿支路追踪回路路径，漏电流检测法适用于对重点馈线实施持续监视；上述三类信号的物理含义各异，其采样频率、滤波带宽及传感器安装位置亦各不相同。若将母线告警、支路响应与末端核验混为同一判据，系统将在电容耦合与负荷噪声干扰下产生不稳定结论^[3]。判别过程应同时关注幅值与相位。低频注入电流在故障支路上形成相对完整的回路，其幅值通常高于健康支路，且相位与注入参考信号保持稳定；邻近支路虽可能因电缆电容及屏蔽层耦合产生小幅感应，但相位一致性及重复性较差。钳形传感器的开口位置、导线包围方式及接地线共穿情况直接影响读数精度，检测前确认传感器零漂及夹持方向，相较于单纯提升报警灵敏度更能有效减少误判。

1.4 保护误动风险检修成本特征

直流接地故障的经济性影响不仅体现在维修材料费用上，更体现在保护误动、操作中断及缺陷升级所造成的综合损失上。采用逐路拉合法时，每一次断开操作均可能使保护、控制或通信设备出现短时失电，对关键负荷支路需预先确认备用电源及安全措施；若在负荷高峰或倒闸操作期间盲目试拉，故障查找本身即构成新的运行扰动。故障定位耗时越长，班组投入、

调度协调及二次安全措施占用时间亦随之增加。检修成本与查找精度直接相关，若仅定位至屏柜层面而未能细化至电缆段、端子箱或机构箱，检修人员仍需扩大拆线与摇测范围，且潮湿、凝露、绝缘老化等可恢复性缺陷可能在处理后再次出现。在线监测与低频定位装置的价值在于减少无效拉合与重复排查，但设备配置须服务于站内负荷等级、馈线数量及历史缺陷类型；对于支路较少、负荷单一的站点，不宜机械配置复杂系统。

2 变电站直流系统接地故障查找方法分析

2.1 分段停电、支路拉合与故障确认技术

分段停电、支路拉合与故障确认技术适用于结构清晰、支路数量有限且负荷可短时退出的直流系统。操作前应按支路规模（8条以下、8-16条及16条以上）进行风险分级，单支路试拉宜控制在30-90秒内完成，可疑支路下级拆分通常按1-2分钟完成一次状态确认，重要保护及通信电源退出前须经至少2人复核。每次拉开支路后观察母线对地电压、绝缘监察告警及支路漏电流是否恢复，若恢复则表明故障位于该支路或其下级回路，若未恢复则立即合闸并转入下一支路；连续拉开超过3条支路仍无变化时，应暂停操作，重新核对母线分段方式、备用电源及图纸边界^[4]。拉合法判据直观、工具简单，但其缺点在于带有扰动性，且对多点接地及高阻接地不敏感；若两条支路同时绝缘下降，拉开其中一条后告警可能仅部分缓解。故障确认阶段应在可疑支路下继续细化分段，结合绝缘电阻测量、端子排拆分及现场环境检查，将查找粒度从屏柜压缩至电缆段或负荷设备。常用查找方法的适用参数见表1。

表1 直直接地故障查找方法适用参数比较

查找方法	适用支路数量	影响时间(s)	注入频率(Hz)	定位粒度	主要限制
分段停电支路拉合	0至8	30至90	0至0	支路或下级段	重要负荷不宜频繁试拉
绝缘电阻分段测量	8至16	60至180	0至0	电缆段或设备端	需拆线并退出部分负荷
低频信号注入检测	16至32	0至30	10至30	故障支路	受对地电容和噪声影响
漏电流钳形检测	16至32	0至0	0至0	异常支路	传感器零漂影响弱信号
在线绝缘监测定位	32至64	0至0	10至30	支路排序或定位点	需完成基线和标签校验
多源状态融合诊断	32至64	0至0	10至30	可疑支路优先级	依赖历史数据完整性

2.2 低频信号扰动注入支路定位技术

低频信号扰动注入支路定位技术可在不停电条件下将可识别信号叠加于直流母线与地之间，接地点所在支路将形成测试电流通道，钳形传感器沿馈线检测该信号的幅值与方向。注入频率通常避开50Hz工频及直流纹波干扰，10-30Hz可作为

现场操作的推荐窗口；当支路对地电容较高时，健康支路亦会出现耦合响应，检测人员需比较同一母线下多条支路的相对幅值、相位稳定性及3次以上重复读数，而非仅关注单次最大值^[5]。注入幅值过低时，长电缆末端响应易被噪声淹没；幅值过高时，则可能影响敏感电子装置或触发误报警。检测点应从馈线屏出口开始，沿端子箱、机构箱及负荷侧逐级移动，发现响应突变点后，再借助绝缘摇测或分段拆线确认边界。注入频率与识别稳定度的关联关系见图1。

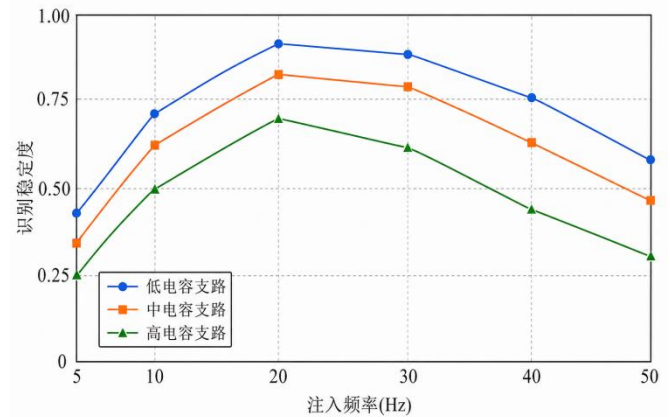


图1 注入频率与支路识别稳定度关系图

图1显示，三类支路的识别稳定度均在20Hz附近达到较高水平，频率升至40Hz后稳定度下降；高电容支路曲线整体位于低电容支路下方，表明支路对地电容越大，注入信号越易受耦合与衰减效应影响。

2.3 在线绝缘监测定位装置应用条件

在线绝缘监测定位装置将母线绝缘状态、支路漏电流、注入信号响应及告警记录集成于同一平台，适用于馈线数量多、无人值守或重要负荷不允许频繁拉合的站点。装置应具备正负极绝缘监测、支路传感器采样、信号注入控制、告警闭锁及通信接口等功能，并保留人工核验入口；支路传感器宜覆盖保护、控制、通信及事故照明等重点回路。定位结果不应仅显示“某屏异常”，还应能追溯检测时间、支路名称、幅值变化及复归过程。装置应用条件须与现场二次回路相匹配。长电缆、并联电源、环形供电及通信设备电源会增大背景噪声，传感器量程不足或安装方向不一致易造成支路排序错误；老旧站点还可能

3 变电站直流系统接地故障查找技术发展趋势

3.1 多源状态量融合支路定位算法

多源状态量融合支路定位算法的发展方向是将母线电压偏移、绝缘电阻、支路漏电流、注入信号相位、环境湿度及历

史缺陷记录共同用于优先级排序。单一幅值排序在潮湿、长电缆及多分支条件下易受偶然噪声干扰,融合算法可先剔除同时升高但相位不稳定的感应支路,再将持续异常、与湿度相关、处于同一端子箱范围内的支路赋予更高权重。此类排序并非替代现场核验,而是引导运维人员优先检查最可能发生绝缘下降的位置^[6]。融合定位应将排序依据直接呈现给运维人员,使其明确某支路被排在前列,是由于漏电流幅值偏高、相位与注入信号一致,还是历史记录显示同一机构箱多次受潮;若系统仅输出黑箱分值,检修人员仍将回归逐路排查模式。算法输出宜同时呈现异常量、基线差值、时间趋势及建议复核点,并对传感器缺失、支路标签不明或数据波动过大的结果自动调低置信度。

3.2 带电检测作业现场安全能力提升

带电检测作业现场安全能力的提升首先取决于边界管控。低频注入、钳形检测及端子箱检查均应在明确工作范围、负荷属性及二次安全措施后实施,保护跳闸回路、遥控回路及通信电源严禁被临时拆线误碰。检测人员进入屏柜前应核对直流电压等级、熔断器状态及端子编号,使用绝缘工具并严格执行单人操作、专人监护制度;在潮湿环境或机构箱内作业时,尚应先处理积水、凝露及金属粉尘等隐患。安全能力的提升还体现在减少非必要的停电试拉^[7]。在线定位与信号注入可将可疑范围缩小至少数支路,重要负荷仅在证据充分时安排短时切换或停电确认。对于反复出现接地缺陷的站点,应将电缆沟积水、端子箱密封性、加热除湿装置、屏蔽层接地及备用芯线绝缘纳入周期性检查,而非每次告警后均从母线重新开始排查。支路基线数据越完整,带电检测中需触碰的端子数量越少。

参考文献:

- [1] 肖磊.变电站直流系统接地故障查找方法研究[J].应用能源技术,2025,(7):40-42.
- [2] 付英男,陈天乐,陈俊峰,等.基于数字孪生的变电站故障诊断与自愈控制技术[J].灯与照明,2026,50(4):220-222.
- [3] 海之晨,刘永军,邵可欣,等.基于行波时频谱图和改进 CNN 的变电站直流系统接地故障定位方法[J].智慧电力,2025,53(7):100-107.
- [4] 何明霞,石光亮.基于低频信号注入法的变电站直流系统接地故障检测方法[J].大众标准化,2024,(15):170-172.
- [5] 程媛,张健韬,李仲强,等.变电站直流系统接地故障查找策略综述[J].南方能源建设,2023,10(5):57-64.
- [6] 马小军,邵永浩.变电站直流系统接地故障准确定位方法研究[J].电工技术,2023,(14):228-231.
- [7] 高椿程.变电站直流系统接地故障分析及处理方法[J].自动化应用,2023,64(6):58-60.

3.3 智能诊断运维联动平台建设

智能诊断运维联动平台的建设应将直流系统接地告警从单点信号转化为完整的缺陷处置流程。平台接收绝缘监测数据、支路传感器信息、站端环境参数及检修记录后,可自动关联站内一次设备操作状态、保护动作情况及直流负荷变化,从而有效区分操作扰动、瞬时受潮与持续性绝缘下降等不同诱因。告警生成后同步推送可疑支路、历史缺陷记录、图纸位置及建议安全措施,班组到场前即可完成工具、备件及操作票准备。鉴于接地故障涉及二次回路安全,平台联动不应削弱人工复核环节,最终处置仍须保留现场测量、拆分验证及缺陷处理记录;智能化建设的核心价值在于保存基线数据、减少重复判断、提示异常模式并形成可追溯的处置档案。后续建设可将移动终端、数字孪生屏柜图与在线监测数据有机结合,使接地点定位从“告警后人工搜索”逐步转向“异常趋势提前暴露、重点支路快速确认”的预防性运维模式。

4 结语

变电站直流系统接地故障查找应将母线结构、绝缘下降形态及负荷重要性作为前置条件,优先确认支路边界与告警极性,再据此选择拉合法、注入法或在线定位方式。分段停电支路拉合法适用于支路较少、负荷可短时退出的场景;低频信号注入法适用于不停电追踪故障回路,但需控制注入幅值并识别对地电容耦合效应;在线绝缘监测定位装置则适用于馈线复杂及无人值守站点。后续运维应持续完善支路基线数据、传感器校验及缺陷记录联动机制,推动接地点查找从经验型排查向多源证据排序与现场复核相结合的模式转变。