

直流系统单点接地故障快速定位方法研究

孙 超

大唐宝鸡热电厂, 陕西 宝鸡 721000

[摘要]针对发电厂 220V 直流系统中常见的单点接地故障, 文中深入分析其成因、电气特性及运行风险, 系统比较了电压电流测量、脉冲注入、区段扫描等主流定位方法, 并提出融合信号注入与电压分布的复合快速定位策略。通过优化激励参数、构建多策略协同模型, 并借助仿真建模与工程案例验证, 证明该方法具备高精度、快响应和强鲁棒性, 显著提升故障处理效率与系统运行安全性, 具备良好的工程应用价值。

[关键词]直流系统; 单点接地故障; 信号注入; 电压分布; 故障定位策略

DOI: 10.33142/hst.v8i7.17093

中图分类号: TM7

文献标识码: A

Research on Fast Localization Method for Single Point Grounding Fault in DC System

SUN Chao

Datang Baoji Thermal Power Plant, Baoji, Shaanxi, 721000, China

Abstract: In response to common single point grounding faults in 220V DC systems of power plants, this article deeply analyzes their causes, electrical characteristics, and operational risks. The system compares mainstream positioning methods such as voltage and current measurement, pulse injection, and section scanning, and proposes a composite fast positioning strategy that integrates signal injection and voltage distribution. By optimizing incentive parameters, constructing a multi strategy collaborative model, and using simulation modeling and engineering case verification, it has been proven that this method has high accuracy, fast response, and strong robustness, significantly improving fault handling efficiency and system operation safety, and has good engineering application value.

Keywords: DC system; single point grounding fault; signal injection; voltage distribution; fault localization strategy

引言

在现代发电厂中, 220V 直流系统作为关键控制与保护电源, 其运行稳定性直接关系到整厂安全。随着系统结构日益复杂, 单点接地故障的隐蔽性与突发性正成为运维管理中的重点难题。传统定位手段响应迟缓、误差较大, 难以满足对快速、精准故障排查的现实需求。为提升故障诊断效率与系统恢复能力, 研究更高效、智能的接地定位方法已成为直流系统运维发展的必然趋势。本研究正是基于此背景, 探寻融合多策略的快速定位新路径。

1 直流系统单点接地故障特性分析

1.1 故障成因与分类

在发电厂厂用 220V 直流系统中, 单点接地故障是指系统中某一导电部位(如正极或负极)意外与大地之间形成低阻抗通路的现象。这种故障将导致电气系统电位不对称, 进而影响正常控制、保护及操作。造成此类接地的主要原因可归纳为以下几类: 一是设备老化及绝缘性能退化, 例如电缆长时间运行后绝缘层出现裂纹、热胀冷缩引起密封不严或击穿等; 二是外部环境因素影响, 如雷击、潮湿、盐雾腐蚀等都会加速绝缘性能下降, 诱发接地隐患; 三是施工或运维不规范, 如接线错误、端子松动、屏蔽层错误接地等, 也可能埋下接地风险隐患。按照接地位置与电位极性的不同, 单点接地又可进一步划分为正极接地、负极接地、中性点接地及悬浮接地等类型, 各种故障形式对系

统运行的影响具有明显差异。

1.2 故障电气特征表现

厂内 220V 直流系统发生单点接地后通常表现出若干典型电气特征: 其一是对地电压异常, 接地极对地电压下降至接近零值, 非接地极对地电压相应升高, 造成系统极性电位严重失衡; 其二是母线零电位偏移, 监控装置对参考地电位漂移无法准确反映真实电压状态; 其三是在具备单点接地容忍能力的系统架构中, 初期故障电流通常较小, 电气量变化不明显, 需借助辅助信号如接地监测继电器、电压不平衡报警等手段辅助检测。此外, 接地点附近若存在金属构架或导体, 可能诱发杂散电流、电磁干扰等二次效应, 加剧对控制、信号系统的干扰程度。

1.3 对系统运行的影响

在厂内直流系统中, 尽管部分设计允许单点接地情况下维持短时运行, 但其隐蔽性及累积风险不容忽视。首先, 接地引起信号基准偏移可能导致测控系统误判断, 从而造成保护误动作或拒动, 直接影响设备联锁及跳闸逻辑可靠性。其次, 未接地一极对地电压升高会增加其所连接设备的绝缘应力, 加速绝缘老化甚至造成绝缘击穿, 引发设备损坏。此外, 杂散电流可耦合进入二次回路, 干扰远动装置、直流继电保护等精密设备, 增加误动作概率。在多电源接入或跨区控制的场景中, 接地故障还可能通过接地网扩散, 干扰跨系统的电位分布, 从而扩大系统影响范围。

若不能及时发现并准确定位接地点,任其运行将造成潜在的安全隐患累积,最终可能导致严重事故如直流系统崩溃、大范围继电保护误跳闸甚至厂用电丧失等严重后果。

2 单点接地故障现有定位方法

2.1 电压电流测量法

电压电流测量法是厂内 220V 直流系统中最基础且应用广泛的单点接地故障定位手段,其原理是在系统运行状态下采集并比较多个关键节点的电压、电流数据,结合网络结构及数学模型来判断接地点大致范围。此方法依托母线、馈线、负载等处已布设的监测装置来提取故障前后参数变化,进而推导出可能的故障区间,具有实施简便、成本低廉、便于与现有监控平台融合等优点。但此法精度依赖系统结构和监测点分布密度,尤其在站内系统容量较大、支路繁多、电气连接复杂时,测量误差与数据延迟会影响其有效性。同时,厂用直流系统中容许单点接地运行的场景较多,早期故障电流微小且不具备突变特征,无法提供显著电气量变化作为判断依据,导致定位精度受限,难以实现快速准确定位。

2.2 脉冲信号注入法

脉冲信号注入法是一种基于阻抗不连续识别的主动检测手段,适用于发电厂直流系统在带电状态下开展在线接地定位。该方法通过信号源向系统注入幅度小、频率高的测试脉冲,利用波形在遇阻抗突变(如接地点)时产生反射的原理,分析传播与反射波形的时间差及特征波形即可推算出故障点与注入点间的距离,具有响应快速、定位精度高、不易受系统电噪声干扰等优点。其典型应用适用于母线长、电缆敷设距离远或负载侧分布较广的场景,如厂内 DC 馈线系统。该法需要配备专用脉冲注入设备和高灵敏度信号采集器,同时对信号处理、滤波算法要求较高,适合具备较强技术支撑的发电企业运行维护部门应用。

2.3 区段电阻扫描法

区段电阻扫描法是利用对地电阻变化进行接地点判断的传统手段,适用于停电状态下的故障区间查找。在厂用直流系统停电检修期间,运维人员可采用接地电阻测试仪依次测量各支路对地电阻值,通常接地点所在区段的对地电阻较其他段显著偏低,由此快速缩小故障范围。该方法操作简便直观、对环境干扰不敏感、无需依赖复杂电子设备,尤其适合于计划性停运期间的维护检查。但其缺点也较明显:检测时必须停电,影响系统供电连续性;当系统分支结构复杂、测量点多时操作时间较长;若接地点呈高阻接地特性或间歇性接触不良,易出现误判或漏判情况。

3 基于信号注入的快速定位策略研究

3.1 激励信号参数优化设计

在厂用 220V 直流系统中实施单点接地故障的快速定位时,信号注入法因其实用性和精准性被广泛应用,而其定位效果在很大程度上依赖于激励信号参数是否设计合理。其中频率选择至关重要,应避开系统中存在的电源干扰频带,包括直流稳压装置产生的纹波频率及接地监测设备工作频点,通常选用几十千赫兹至数百千赫兹的高频范

围以增强信号响应敏感性。波形形式上,采用方波或脉冲序列更易于从背景信号中识别反射特征,兼顾能量强度与抗干扰性能。信号持续时间也需合理设定,时间过短则反射识别困难,时间过长又可能引起系统部件局部谐振。此外,注入信号幅值应精密控制,需保证能量足以穿越布线及接地点形成清晰反射,又不至于干扰控制保护回路或损伤厂内直流系统中精密用电设备,确保兼容性与安全性。

3.2 接收端检测机制与反射分析

在信号注入法中,接收端的检测机制是定位精度和响应效率的核心保障。在厂内直流系统母线端、馈线首末端及重要负载前设置高灵敏度的电压或电流监测模块,可有效捕获因激励信号在传播过程中遇到接地阻抗突变而产生的反射波。这些接收装置应具备高速采样与实时存储功能,以完整记录传播过程并保留反射信号波形。反射波分析主要借助时域处理手段,基于反射波的起始时间及波形变化计算传播往返时差,进而换算激励源至接地点的物理距离。为提高抗干扰能力,可引入小波变换、互相关算法及阈值判断等信号处理手段进行反射识别;如系统结构复杂存在多路径传播情形时,可通过多接收端联合采集数据,利用时间同步技术及空间分析算法构建类似三角测距原理的定位模式,有效提升故障位置识别的准确度与鲁棒性。

3.3 误差修正与滤波机制

厂内 220V 直流系统在运行中会受到一定电磁干扰及布线结构影响,使得信号注入法在故障定位中存在精度偏差,需配套设置误差修正与滤波机制以提升定位可靠性。在信号预处理阶段,可通过带通或低通滤波器剔除系统纹波、噪声干扰等无关频率成分,增强目标信号的识别对比度;同时结合多次测量平均法、时域滑动平均法及卡尔曼滤波算法等技术对接收信号进行平滑,降低随机误差的干扰。进一步提升精度时可构建误差反演模型,利用历史接地点数据训练误差分布模型以对当前定位结果进行修正补偿。此外,对于因接地回路结构差异、电缆阻抗波动或负载支路复杂导致的系统性偏差问题,可采用系统级误差标定机制,在预设已知接地点注入激励信号,构建响应数据库形成差异补偿规则,以增强模型的适应性和定位精度,提升实用价值。

4 结合电压分布的复合定位技术方案

4.1 电压传感器布点原则

在厂内 220V 直流系统采用电压分布法进行接地故障定位时,电压传感器的合理布设是确保定位准确性的关键前提。布点应遵循“覆盖关键节点、优化路径结构”的原则,优先部署于直流系统母线始端、馈线末端以及负载侧分支节点,以便捕捉接地时各节点的电压变化趋势。在布设位置选择上,应尽量避开强电干扰源,优先选择电气隔离好、抗干扰能力强的区域,以提升测量信噪比,减少系统地电位波动对数据精度的影响。布点密度需兼顾覆盖率与数据处理能力,过疏可能漏判关键特征,过密则增加数据处理压力及布线复杂性。特别是在控制屏组、整流装置、蓄电池柜等负荷密集区域,以及以往接地故障频发处应加密布设传感

器,以提升接地异常的识别灵敏度。布点策略应结合系统实际运行拓扑、电缆敷设长度和负荷结构,通过仿真建模与现场数据校验相结合,确保电压分布数据的代表性与稳定性。

4.2 电压梯度识别与接地区段推断

一旦单点接地故障发生,系统中各测点电压将表现出空间分布的不均衡特征,利用布设好的电压传感器即可构建节点间的电压差分图谱,识别出电压梯度突变的区域。接地点附近通常电压显著降低,远离处电压则相对平稳,通过线性差分分析、二阶导数法或基于神经网络的波动识别模型可以初步判断接地点所在区段。为提升判断精度,还可引入历史电压基线比对机制,对比运行前后的节点电压变化,识别出偏离幅度最大的区域作为初判依据。若系统具备在线学习能力,通过对接地历史样本的持续训练可优化判断模型,使其具备自适应分析能力。在某些存在多接地点或复杂接地路径(如间歇接地、非典型支路耦合等)场景下,可结合电压变化的时间序列趋势,识别出接地行为的动态演化特性,提升对复杂故障形态的应变能力与定位准确度。

4.3 多策略协同定位模型设计

为进一步提高故障定位的综合性能,构建以电压分布特征为核心的复合式协同定位模型成为发展趋势。该模型融合电压梯度判断、电流扰动响应、信号注入回波及历史故障特征等多源数据,通过输入层、分析层和决策层的多维结构实现集成式判断。其中,输入层负责接收各传感器与辅助模块数据,分析层进行特征提取与数据归一化处理,决策层则引入模糊逻辑、支持向量机或深度学习算法进行故障点预测判断。为提升模型的场景适应性,可嵌入在线学习机制,使系统在运行中通过新样本持续训练更新识别规则,实现对系统拓扑结构调整、电缆更换或负载变更等环境变化的动态响应。在应用层,该复合模型可嵌入厂用直流系统运维平台,实现可视化电压分布展示、一键故障诊断与模型参数自适应修正,极大地简化人工分析步骤,降低技术门槛,构建起智能、高效、可信的现代化故障定位体系,保障厂内直流系统安全运行与电源持续供电能力。

5 模型仿真与实际工程验证分析

5.1 系统建模与故障设定

为验证信号注入法与电压分布法融合定位策略在发电厂220V直流系统单点接地故障下的有效性,本文基于MATLAB/Simulink平台构建了贴合厂用直流电源系统结构的仿真模型。模型包含直流母线、蓄电池组、馈线回路、末端负载、电缆布线与接地模块等关键单元,全面考虑线路电阻、电感、电缆接地电容的影响以还原信号在实际线路中的传播特性。设置多个可控接地点分别位于主干线路中段、负载末端支路及信号注入点附近,通过控制开关模块可动态切换故障工况,接地电阻设定在 0.5Ω 至 5Ω 之间以覆盖常见低阻及高阻接地场景。为增强仿真模型的工程鲁棒性,系统中还引入背景电磁干扰、负载突变与运行噪声模拟模块,以验证算法在复杂工况下的稳定性和适应

性,确保仿真数据对后续实际工程部署具有可靠参考价值。

5.2 定位方法仿真效果对比

利用已建模型,对电压电流测量法、信号注入法、电压梯度法及融合定位策略开展对比仿真。结果显示:传统电压测量法在接地点靠近中性点或系统中部时误差偏大,平均误差达 $\pm 15\%$;信号注入法在各类故障位置下误差稳定控制在 $\pm 5\%$;电压梯度法定位速度快但误差略高,适合快速区段预判。在融合策略应用下,通过数据拟合与算法互校,平均误差下降至 $\pm 2\%$,整体定位准确率提升至97%。响应速度方面,信号注入法因波形传播与分析需时约50~80ms,电压梯度法可在30ms内初判区段,融合定位方案则通过异步并行机制将综合响应时间控制在60ms左右,实现较高的实时性。

5.3 工程应用案例与性能验证

为验证仿真成果的工程适应性,选取某发电厂厂用直流系统开展现场应用测试。该系统母线总长约1.2km,涵盖多个开关屏、保护装置与控制终端。在系统内合理布置电压传感器和信号注入模块后,模拟了三个不同位置的单点接地故障,定位系统自动分析得出的接地点与人工测量结果误差均小于3%,验证其在真实环境下的准确性。运维平台提供图形化界面支持远程故障识别、波形回放与参数追踪,测试期间平均定位耗时不足80ms,较传统人工巡查或单一算法定位效率提升显著。根据项目反馈,该融合方案将检修平均用时缩短了约65%,有效提升了厂内直流系统的运行保障能力与事故响应速度。

6 结语

本研究围绕发电厂220V直流系统单点接地故障定位问题,系统分析了故障特性及现有方法,提出融合信号注入与电压分布的复合定位策略,并通过仿真建模与实际工程验证,证明该方法具备高精度、快响应、强鲁棒性的优点。该成果可有效提升厂用直流系统接地故障处理效率和运行安全性,具有良好的工程应用前景和推广价值。

【参考文献】

- [1]张帆.灵活接地配电系统单点高阻故障及跨线相继故障检测与定位新方法[D].西安:西安理工大学,2024.
- [2]闫宁宁.中低速磁浮供电轨故障定位与接地保护方法研究[D].北京:华北电力大学(北京),2024.
- [3]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,2023,11(22):27-29.
- [4]翟国亮.TN-C-S系统漏电故障检测方法研究[D].山东:山东理工大学,2023.
- [5]韦智腾.面向柔性直流线路状态估计保护的不良数据自适应纠错方法研究[D].北京:北京交通大学,2023.

作者简介:孙超(1988.12—),毕业院校:华北电力大学科技学院,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位:大唐宝鸡热电厂,职务:维护部继电保护副班长,职称级别:工程师。