

大型火力发电厂6kV厂用电系统接地故障原因分析与处理对策

罗 乘 王 玥

中国电建集团湖北工程有限公司 湖北 武汉 430000

摘要: 6kV厂用电系统作为大型火力发电厂的核心“生命线”，其安全、稳定、可靠运行直接关系到整个机组乃至全厂的安全生产。该系统普遍采用中性点不接地或经消弧线圈接地方式，单相接地故障虽不会立即导致供电中断，但若处理不当，极易引发弧光过电压、相间短路等恶性事故，严重威胁设备绝缘和人身安全。本文深入剖析了大型火电厂6kV厂用电系统单相接地故障的机理、特征及其潜在危害，并系统性地梳理了故障发生的主要原因，涵盖一次设备绝缘劣化、二次回路及监测装置缺陷、外部环境因素及人为操作失误等多个维度。在此基础上，结合现场实践经验，提出了一套从预防、监测、定位到快速隔离的全流程、多层次综合处理对策。重点论述了基于暂态信号、注入信号及人工智能技术的先进选线与定位方法的应用前景，并强调了健全管理制度、提升人员技能在故障防控体系中的关键作用。旨在为电厂运维人员提供一套科学、高效的故障应对指南，全面提升6kV厂用电系统的本质安全水平。

关键词: 火力发电厂；6kV厂用电系统；单相接地故障；故障原因

引言

我国大型火电厂6kV厂用电系统多采用中性点非有效接地方式，包括不接地和经消弧线圈接地系统。此设计优势在于单相接地故障时电流小，系统能对称运行1-2小时，为运行人员争取排查处理时间，提高供电连续性。但“允许带故障运行”也有弊端，易让运行人员麻痹，忽视单相接地故障风险。单相接地时非故障相对地电压升至线电压，加速设备绝缘老化，且间歇性电弧接地会产生高弧光接地过电压，破坏性强，可能引发重大事故。所以，深刻理解6kV厂用电系统单相接地故障机理，精准识别原因，建立有效的预防、监测、定位与处理策略，是保障大型火电厂安全稳定运行的核心课题。

1 6kV厂用电系统接地故障机理与危害

1.1 故障基本机理

在正常运行状态下，6kV系统三相对地电容电流基本平衡，中性点电位为零。当中性点不接地系统中A相发生金属性接地故障时（如图1所示），A相对地电压降为零，而B、C两相对地电压则升高至线电压（ $\sqrt{3}$ 倍相电压）。此时，接地点流过的电流主要是由B、C两相通过各自对地电容返回的电容电流之和，即系统的总对地电容电流 I_c 。

$$I_c = 3\omega C_0 U_\phi$$

其中， ω 为角频率， C_0 为每相对地电容， U_ϕ 为相电压。

对于经消弧线圈接地的系统，消弧线圈（一个可调电感）被接入中性点。其核心原理是利用电感电流

I_L 与系统对地电容电流 I_c 的相位相反特性，在发生单相接地时，通过调节消弧线圈的电感值，使其产生的感性电流尽可能补偿掉容性电流，从而使流过接地点的残余电流（ $I_r = I_c - I_L$ ）减小到不足以维持电弧的程度，实现自动熄弧。

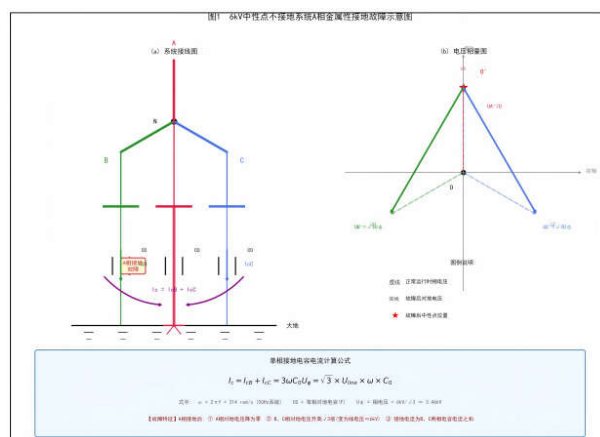


图1 6kV厂用电系统接地故障示意图

1.2 主要危害分析

尽管单相接地故障初期不影响供电，但其衍生的危害不容小觑：（1）弧光接地过电压：这是最具破坏性的危害。当接地故障点接触不良（如电缆头松动、绝缘局部击穿）形成间歇性电弧时，电弧的反复燃灭会导致系统能量的反复充放电，从而在系统中激发高频振荡，产生幅值极高的过电压。此过电压可轻易超过设备的工频耐压水平，导致多点绝缘击穿，将简单的单相故障升级

为灾难性的相间短路。(2)设备绝缘加速老化与损坏:非故障相长期承受线电压,会使电机、变压器、电缆等设备的绝缘处于高应力状态,加速其热老化和电老化过程,缩短设备寿命,增加后续故障的概率^[1]。(3)铁磁谐振过电压:在特定条件下(如电压互感器饱和、系统参数匹配),单相接地可能激发系统中的电磁式电压互感器(PT)与对地电容之间的铁磁谐振,产生持续时间长、幅值高的过电压,同样危及设备安全。(4)人身安全风险:接地点附近会形成跨步电压和接触电压。如果故障未能及时发现和隔离,人员误入该区域,有触电伤亡的风险。(5)影响系统稳定性:虽然单相接地本身不直接导致系统失稳,但由此引发的相间短路等次生灾害,会瞬间产生巨大的短路电流,可能导致保护装置动作,切除重要负荷,甚至影响主系统的稳定运行。

2 接地故障主要原因分析

2.1 一次设备绝缘劣化与损坏

这是导致接地故障最常见、最直接的原因。(1)高压电动机绝缘故障:6kV系统中驱动引风机、送风机、磨煤机、给水泵等关键辅机的高压电动机数量众多。这些电机长期处于高温、高湿、粉尘、振动等恶劣工况下,其定子绕组的绝缘(尤其是槽口、端部)极易受潮、磨损、老化,最终导致对地击穿。(2)电力电缆故障:6kV电缆是连接开关柜与负荷的重要纽带。故障常发生在以下位置:一是电缆终端头/中接头:制作工艺不良(如应力锥处理不当、半导体层剥离不净、密封不严)、材料老化、受潮是主要诱因。二是电缆本体:外力损伤(施工、鼠咬)、长期过负荷导致绝缘热击穿、绝缘材料本身存在缺陷等^[2]。(3)开关柜内部故障:一是绝缘子/套管闪络:表面积污受潮后,在高电压下发生沿面放电。二是母排支持绝缘子破裂:机械应力或老化导致。三是手车触头盒、活门机构绝缘损坏:操作频繁、材质老化或设计缺陷。(4)干式变压器故障:厂用低压变、除尘变等干式变压器,其绕组绝缘在长期运行中也可能因过热、受潮或制造缺陷而发生接地故障。

2.2 二次回路及监测装置缺陷

监测与保护系统的失效,使得故障无法被及时、准确地发现和定位。(1)零序电流互感器(CT)问题:安装不规范(如电缆屏蔽层接地线未穿过CT)、精度不足、饱和特性差或本身损坏,导致采集的零序电流信号失真或缺失,直接影响接地选线装置的判断。(2)电压互感器(PT)及消谐装置故障:PT高压侧熔断器一相熔断,会在开口三角形绕组上产生虚假的零序电压信号,误导运行人员。PT本身绝缘损坏或消谐装置(如一次消

谐器、二次微机消谐装置)失效,无法抑制铁磁谐振,也可能表现为类似接地的现象。(3)接地选线装置性能不佳:传统的基于稳态基波零序电流比幅、比相原理的选线装置,在故障电流微弱、线路结构复杂(如电缆出线多)或存在不平衡电流干扰的情况下,选线准确率不高,常常出现“选线失败”或“误选”的情况。

2.3 外部环境与运行条件因素

(1)恶劣天气:雷雨、大雾、凝露天气会显著降低户外或半户外设备(如封闭母线、电缆隧道入口)的绝缘水平,诱发闪络接地。(2)小动物侵入:老鼠、蛇等小动物窜入开关柜内,造成相间或相对地短路。(3)系统谐振:在特定运行方式下(如某段母线空载或轻载),系统参数可能恰好满足谐振条件,产生谐振过电压,进而导致绝缘薄弱点被击穿。(4)系统对地电容电流增大:随着电厂扩建或改造,6kV系统电缆长度不断增加,导致系统总的对地电容电流显著增大。若原有的消弧线圈容量不足或未及时调整,其补偿效果将大打折扣,使得接地电弧难以自熄,增加了故障危害。

2.4 人为因素与管理疏漏

(1)检修维护不到位:未能严格执行定期预防性试验(如电机绝缘电阻、直流泄漏、交流耐压试验;电缆的绝缘电阻、直流耐压试验),未能及时发现设备的绝缘隐患。(2)操作失误:在倒闸操作、设备检修过程中,误碰、误接线或安全措施执行不彻底,可能直接引发接地故障。(3)运行监视疏忽:运行人员对后台监控系统中的零序电压告警信号不够敏感,未能在规定时间内进行有效排查。

3 接地故障处理对策研究

针对上述原因,必须构建一个集“预防为主、精准监测、快速定位、高效隔离”于一体的综合处理对策体系。

3.1 强化源头预防与设备管理

(1)提升设备质量与安装工艺:严格把控高压电机、电缆、开关柜等关键设备的采购、验收和安装质量。特别是电缆头的制作,必须由经过认证的专业人员,严格按照工艺规程执行,并做好影像记录。(2)完善预防性试验制度:制定科学、严格的预试周期和项目。重点关注电机的绝缘电阻吸收比(R_{60s}/R_{15s})、极化指数(PI)以及直流泄漏电流;对运行年限较长的电缆,应考虑开展超低频(VLF)耐压试验或振荡波(OWTS)局放检测,以更有效地发现潜在缺陷^[3]。(3)改善运行环境:在开关室、电缆夹层等区域加装除湿、通风、空调设备,确保环境温湿度在允许范围内。封堵所有可能的小动物入口,必要时安装驱鼠、驱蛇装置。

3.2 优化监测与选线技术

这是处理接地故障的核心环节。应摒弃单一依赖传统选线装置的做法,采用多技术融合的策略。(1)应用先进选线原理:一是暂态信号选线法:单相接地瞬间会产生丰富的暂态高频信号(通常在几百Hz到几kHz)。故障线路的暂态零序电流幅值远大于非故障线路,且方向相反。基于此原理的选线装置不受消弧线圈影响,灵敏度高,抗干扰能力强,是目前公认的最有效方法之一。二是信号注入法:在PT开口三角处注入一个特定频率(如200-300Hz)的低频电流信号。该信号只在故障线路上形成回路。通过在各出线安装的探测器检测该注入信号的有无,即可准确选出故障线路。此方法原理简单,可靠性高。三是行波测距法:利用故障产生的行波在线路中的传播特性进行故障测距。虽然主要用于输电线路,但在结构清晰的厂用电系统中也有应用潜力。(2)引入智能诊断技术:结合大数据分析和人工智能(AI)算法,对历史故障数据、实时运行数据(零序电压、电流波形、谐波含量等)进行深度学习,建立故障模式识别模型,实现故障类型的智能诊断和故障区间的初步预测,为人工排查提供决策支持。

3.3 规范故障处理流程与方法

一旦发生接地告警,必须遵循标准化的处理流程:

(1)确认与记录:首先在后台监控系统和就地表计上确认零序电压是否确实升高(通常 $>15V$ 即需关注, $>30V$ 为明显接地),并记录告警时间、母线段、电压值等信息。(2)初步判断:区分是真接地还是PT断线。可通过检查PT二次侧三相相电压来判断:若一相电压为零,另两相为相电压,则为PT高压熔断器熔断;若一相电压降低,另两相升高至线电压,则为真接地^[4]。(3)拉路选线(传统但有效):在无法依靠选线装置或选线结果存疑时,采用“瞬停法”。按照预先制定的、风险可控的拉路顺序(通常先停备用、次要负荷,再停重要负荷),逐一瞬时断开各出线开关,观察零序电压是否消失。此方法要求操作迅速,并做好事故预想,防止重要辅机停运导致机组跳闸。(4)利用便携式定位仪精确定位:一旦选出故障馈线,可使用便携式电缆故障定位仪(如基于脉冲反射法或电桥法的仪器)或接地故障指示器,沿着电缆路径进行巡检,快速缩小故障范围,直至

找到具体的故障点(如某个电机接线盒、某段电缆)。

(5)隔离与修复:找到故障点后,将其可靠隔离(拉开开关、摇出手车、合上接地刀闸),办理工作票,组织检修人员进行修复。修复后必须进行严格的绝缘测试,合格后方可恢复送电。

3.4 加强人员培训与制度建设

(1)常态化应急演练:定期组织运行、检修人员进行6kV接地故障处理的仿真演练或桌面推演,使其熟练掌握处理流程、风险点和安全措施。(2)建立故障案例库:对每次发生的接地故障进行详细记录、分析和归档,形成案例库,用于后续的培训 and 经验反馈。(3)明确岗位职责:制定清晰的《6kV系统接地故障处理预案》,明确运行、继保、检修等各专业在故障处理中的职责分工和协作流程。

4 结语

大型火力发电厂6kV厂用电系统单相接地故障常见但风险大,其成因复杂,有设备绝缘老化等内在因素,也有环境、运行、管理等外在因素,防控需系统性思维。要坚持“预防胜于治疗”,从设备选型、安装、维护源头筑牢防线;推广智能选线与定位技术,解决“找不到、找不准”难题;建立并执行标准化应急处理流程,加强人员培训演练,确保高效应对;利用信息化手段提升故障预测和健康管理能力。只有将先进技术与精细管理深度融合,构建全方位、立体化防控体系,才能保障6kV厂用电系统安全稳定运行,为大型火电机组长周期、高效率、零非停目标提供坚实支撑。

参考文献

- [1]刘新超,杨小玲.火电厂6kV厂用电系统接地故障保护优化[J].电力设备管理,2025,(21):22-24.
- [2]梁楠.关于6kV母线送电过程中接地告警的分析与解决方案[J].电工技术,2025,(16):275-277.
- [3]陈凯平,马宏文,李杰.中性点不接地系统中6KV母线单相接地故障分析及继电保护优化[C]//中国机电一体化技术应用协会.第七届全国石油和化工电气设计与应用论文大赛入选论文集.中国石油兰州石化公司,;2024:675-678.
- [4]俞迦楠,韩文轩,傅裕,等.6kV干式变压器接地短路故障原因分析[J].电工技术,2024,(01):163-165.