

发电厂主变压器铁芯多点接地故障原因剖析与防治措施

易雪莲

四川小金川水电开发有限公司 四川 阿坝州 624200

摘要:主变压器铁芯多点接地是发电厂常见的恶性电气故障,严重威胁设备安全运行。本文从铁芯单点接地的必要性入手,系统分析了绝缘老化、异物入侵、制造工艺缺陷及金属异物引发多点接地的物理机制,建立了“局部过热—油中气体异常—绝缘劣化”的故障演化链。基于故障类型差异,提出了在线监测预警、不停机处理与停机检修相结合的分级防治策略。定期检测铁芯绝缘电阻与接地电流可实现故障早期识别,配合规范检修工艺与标准化验收流程,可显著降低故障发生率,为发电厂主变压器安全运行提供技术保障。

关键词:发电厂;主变压器;铁芯多点接地;故障诊断;防治措施

引言:变压器是发电厂的枢纽设备,其运行可靠性直接影响电力生产安全。正常运行时,变压器铁芯必须且只能有一点接地,以防止电位悬浮引发绝缘击穿。当铁芯出现两点及以上接地时,形成闭合电气回路,感应电流可达数十甚至上百安培,导致局部过热、油质劣化甚至绝缘击穿,严重时烧毁变压器。多点接地故障隐蔽性强、发展速度快,从发生到引发事故往往仅有数小时窗口期,是变压器非计划停运的主要诱因之一。本文梳理多点接地的故障机理与典型原因,提出系统性防治措施,为发电厂变压器运维提供参考。

1 变压器铁芯接地系统工作原理

1.1 铁芯接地的必要性

变压器运行过程中,铁芯处于高电压交变磁场中,对地存在很高的感应电位。若不将铁芯可靠接地,铁芯与油箱及夹件之间会产生断续放电,形成悬浮电位放电现象。这种放电虽能量较小,但长期存在会逐步侵蚀绝缘材料,最终引发绝缘击穿事故。另一方面,绕组与铁芯之间、铁芯与油箱之间存在分布电容,在高电压作用下电容电流可累积至危险水平。将铁芯通过铜片或接地片与油箱可靠连接,可使上述电荷及时泄放入地,将铁芯电位钳制于地电位,消除静电放电隐患。因此,铁芯单点接地是变压器安全运行的基本保障条件。

1.2 单点接地的技术要求

变压器铁芯接地在技术上要求“只能一点接地、必须可靠接地”。铁芯与油箱之间通过接地铜片或接地套管实现单点电气连接,接地片的截面积需满足热稳定要求。单点接地的核心在于避免形成闭合回路。当只有一点接地时,铁芯与油箱之间没有完整的电气通路,感应电流无法形成循环。一旦出现第二个接地点,铁芯、油箱和接地线之间即构成闭合回路,在交变磁场感应下产

生环流。该环流大小与铁芯磁通密度和接地位置有关,严重时可超过变压器额定电流的10%,产生的热量足以造成局部金属熔化和绝缘碳化^[1]。

1.3 多点接地的电气机理

多点接地的电气本质是闭合铁芯回路中的感应环流问题。当铁芯存在两个及以上接地点时,接地点之间的铁芯段与接地线构成闭合导电回路,该回路包围了一定区域的交变磁通,根据法拉第电磁感应定律,回路中产生感应电动势,进而形成环流。环流的热效应集中于接地点附近的狭小区域,该处接触电阻的存在使发热更为剧烈。温度升高导致接触面氧化,氧化又增大接触电阻,形成正反馈,温度急剧上升。与此同时,环流产生的磁场对变压器内部漏磁场分布产生干扰,可能影响绕组电抗参数,严重时可能引发电磁振动异常。环流还加速接地片的电化学腐蚀,降低接地可靠性。

2 多点接地故障原因分析

2.1 绝缘老化引起的接地故障

变压器长期运行中,铁芯与夹件、压钉等结构件之间的绝缘垫块和绝缘纸板在电、热、机械应力联合作用下逐渐老化。绝缘材料老化表现为机械强度下降、收缩变形和绝缘电阻降低。当绝缘垫块老化收缩后,铁芯与夹件之间的绝缘距离减小,在电磁振动作用下铁芯与夹件可能发生直接接触,形成新的接地点。这种由老化引发的接地通常发生在运行15年以上的变压器中。油纸绝缘老化还产生酸性物质,腐蚀金属表面,在铁芯与夹件之间形成导电桥接通道,进一步降低绝缘水平。定期检测绝缘电阻可有效监测老化进程,当绝缘电阻值下降至初始值的50%以下时,应引起高度重视。

2.2 异物入侵引发的接地故障

变压器制造、运输、安装或检修过程中,金属异

物、金属碎屑、焊渣等导电颗粒进入油箱内部是引发多点接地的常见原因。异物来源包括：制造时清理不彻底的金属切屑和焊接飞溅物；运输过程中因颠簸从结构件上脱落的金属碎片；检修时工具或材料遗落在油箱内。这些导电颗粒在变压器运行中在油流和电磁力作用下迁移至铁芯与夹件之间，一旦卡滞形成桥接，即造成新的接地点。统计表明，因异物引发多点接地故障占比约为30%至40%，在变压器投运初期尤为多发。防止异物进入的关键在于严格制造和检修全过程清洁度控制，并对变压器油进行严格的颗粒度检测^[2]。

2.3 制造及安装工艺缺陷

制造和安装阶段的工艺缺陷是铁芯多点接地的结构性原因，铁芯叠片过程中毛刺未清除干净，相邻硅钢片之间的金属连通形成接地点；接地片固定不牢固，运行中位移与油箱壁接触；绝缘件尺寸偏差导致安装后与预期位置不符，产生额外接触点。穿心螺杆绝缘不良也是常见缺陷，螺杆与铁芯之间的绝缘套管若存在划伤或破损，螺杆即成为铁芯与夹件之间的导电通路。安装过程中接地片未按设计要求固定或引出线位置不当，投入运行后因振动发生位移造成接地。此类缺陷隐蔽性极强，出厂试验中通常难以发现，在运行中逐渐暴露，往往成为突发性故障的根源。

2.4 金属异物与悬浮电位放电演变

油箱底部沉积的金属颗粒在变压器运行中形成动态导电桥。这些颗粒在油流循环作用下被扬起并在电场中排列成导电链，当导电链连通铁芯与油箱时形成瞬时或间歇性接地。此类接地具有间歇性和不稳定性，故障现象时有时无，诊断难度较大。铁芯与结构件之间产生悬浮电位放电时，放电使局部金属表面熔化形成微小突起，多次放电后突起连接两端形成永久性导电通道。这一演变过程从绝缘下降到彻底导通可能持续数月甚至数年，定期进行局部放电检测可捕捉这一过程的早期信号，为预防性检修争取时间。

3 故障诊断与检测方法

3.1 油中溶解气体分析

铁芯多点接地引发的局部过热使变压器油分解产生特征气体，油中溶解气体分析是判断多点接地故障最有效的手段。主要特征气体为乙烯和甲烷，当热点温度超过300℃时乙烯占比显著上升。气体含量变化速率比绝对含量更具诊断价值，若总烃含量持续增长且乙烯占比超过30%，应高度怀疑存在多点接地。数据异常识别标准为：总烃含量超过注意值150微升/升且乙烯含量超过20微升/升。该方法可在不停电情况下进行，周期短、灵敏度

高，配合趋势分析可实现故障早期预警。实际应用中应每3个月至少进行一次油中溶解气体分析，对异常变压器应缩短为每月一次。

3.2 铁芯接地电流在线监测

铁芯接地电流的大小直接反映故障严重程度，正常运行状态下，铁芯接地电流通常小于0.1安培，主要由高次谐波感应产生。当出现多点接地时，环流急剧增大，实测值可达5至100安培。采用穿心式电流互感器或霍尔传感器实时监测接地线电流，设定分级预警阈值。三级预警阈值为0.1至1.0安培，提示需加强监测频次；二级预警为1.0至10安培，需尽快安排诊断测试；一级预警为大于10安培，须立即申请停运处理。在线监测系统应具备数据远传和趋势分析功能，当电流突变率超过50%时自动触发报警，确保运行人员及时获取异常信息。

3.3 绝缘电阻与直流电阻测试

停电状态下对铁芯绝缘电阻进行测试是确认多点接地故障的可靠方法，适用于计划检修或故障排查场景。采用500伏或1000伏兆欧表测量铁芯对地绝缘电阻，正常情况下铁芯对地绝缘电阻应大于200兆欧，表明绝缘系统完好。当测值低于10兆欧时，基本可判断存在多点接地或绝缘严重劣化。对于介于10至200兆欧之间的测值，需结合历史数据和油中气体分析结果综合判断。直流电阻测试可辅助定位接地点位置，该方法通过在铁芯不同测点施加直流电流并测量电压降，根据各测点电阻分布规律推算接地点的空间大致区域，为后续开盖检查提供精确定位指导。电气定位法操作简便、准确性较高，但需设备停运方可实施。两种测试方法应结合使用，绝缘电阻测试作为定性判断手段快速筛查异常，直流电阻测试作为精确定位手段锁定故障区域，两者配合形成完整的停电诊断方案^[3]。

3.4 辅助诊断技术

油流带电检测通过测量变压器运行中油流的静电电荷密度，间接判断内部绝缘状态。多点接地产生的高温使油中杂质颗粒带电量增加，油流带电水平显著上升。红外热成像通过检测油箱表面温度分布差异推断内部过热区域位置，多点接地导致的过热会沿铁芯路径在油箱表面形成特征热区。振动信号分析通过在箱壁安装加速度传感器采集振动频谱，多点接地导致的环流会产生特定频率的电磁振动分量。多种方法综合应用可提高诊断准确性，降低误判率。红外热成像和振动分析可在不停电状态下快速扫查，适合作为日常巡检的补充手段。

4 防治措施与处理策略

4.1 设计制造阶段预防

设计阶段应合理布置铁芯接地引出线位置,确保接地线便于运行中监测和检修维护。接地片与铁芯连接处采用压接方式,减少焊接带来的热影响,连接截面按承受持续环流条件设计。铁芯与夹件之间采用高绝缘强度的绝缘件,绝缘件材料应选用耐热等级为F级以上的工程塑料或环氧玻璃布板。制造过程中实施全过程清洁度管理,在铁芯叠装、器身套装、引线焊接等关键工序设立清洁度检查点,杜绝金属异物残留。出厂试验阶段进行铁芯绝缘电阻测试和感应耐压试验,验证单点接地的可靠性和绝缘系统的完整性,从源头消除结构缺陷。

4.2 安装与检修工艺控制

现场安装过程中应严格执行清洁工艺,器身检查时采用专用覆盖物保护已装配部件,避免异物落入。连接接地片时确认接触面清洁并涂导电脂,紧固力矩符合设计要求。检修后封闭人孔门前执行内部检查确认程序,由质检员、技术员和检修负责人三方共同确认内部无遗留物。器身干燥处理时控制温度和升温速率,防止绝缘件因热应力产生裂纹或变形。工艺控制的关键在于形成可追溯的质量记录,每道工序完成后由操作者和质检员双重签字确认。对于改造或大修后的变压器,应适当延长空载运行时间,使内部绝缘系统充分稳定后再逐步加载。

4.3 运行维护与在线监测

运行阶段的核心措施是建立定期检测与连续监测相结合的监控体系,每季度进行油中溶解气体分析,每年进行铁芯绝缘电阻测试,形成不少于三年的历史数据用于趋势分析。安装铁芯接地电流在线监测装置,实时跟踪接地电流变化,数据接入厂级监控信息系统或分散控制系统,实现异常自动报警。当接地电流超过预警值时应缩短检测周期至每周一次,并辅以红外热成像和油流带电检测综合判断。运行人员应建立设备健康档案,记录每次检测数据及设备运行工况变化情况,为状态评估和检修决策提供依据^[4]。

4.4 故障处理策略与工程案例

根据故障类型和严重程度选择分级处理方案。轻微故障,当接地电流小于1安培且气体含量稳定在注意值以下时,可采用限流电阻串入接地回路,限制环流至安全

范围,同时利用停机机会处理。中等故障,当接地电流1至10安培或气体含量持续增长时,应安排计划停运,采用低压脉冲法或直流电阻法精确定位接地点,对定位故障点进行绝缘修复或结构隔离。严重故障,当接地电流大于10安培或气体含量快速上升时,须立即停运处理,放油后开盖检查,直接处理故障点。某发电厂一台240兆伏安主变压器因穿心螺杆绝缘破损引发多点接地,接地电流达15安培,经放油开盖检查更换破损绝缘套管并清理铁芯接地片后恢复正常,故障处理全过程历时7天,避免了设备烧毁事故。分级处理策略需结合设备重要性、负荷需求和检修资源综合制定。

结束语

主变压器铁芯多点接地是威胁发电厂主设备安全的常见故障,其根本原因是铁芯与结构件之间出现了非预期的第二条接地通路,形成了感应环流。本文系统剖析了绝缘老化、异物入侵、制造工艺缺陷、金属异物演变等四类主要故障原因,明确了各类故障的成因机制与演化规律。在此基础上建立了以油中溶解气体分析、接地电流在线监测、绝缘电阻测试为核心的诊断方法体系,提出了贯穿设计制造、安装检修、运行维护、故障处理全过程的四层级防治策略。当前多点接地故障的定位精度和处理效率仍有提升空间,后续可进一步研究基于人工智能的故障预警系统与不停机处理技术。

参考文献

- [1] 咸日常,李云,刘焕国,等. 电力变压器内部故障的递进分层诊断方法[J]. 电网技术,2025,49(4):1726-1734,中插106-中插108.
- [2] 姚远,郭瑞,李洋,等. 变压器铁芯接地电流在线监测装置自制技术探究[J]. 电子元器件与信息技术,2024,8(11):194-196,200.
- [3] 石征. 变压器铁芯多点接地故障诊断与处理[J]. 今日自动化,2024(2):50-52.
- [4] 包玉树,胡永建,吕佳,等. 变压器铁芯接地电流在线监测系统的设计及其带电检测不确定度评定[J]. 电测与仪表,2023,60(4):150-154.