

换流站换流变分接开关控制原理及故障浅析

王思田 园

国网宁夏电力有限公司超高压公司 宁夏 银川 750000

摘要：换流变分接开关是直流输电系统调压稳功率的核心设备，适配交直流联动调控工况，具备高频次、高精度调压特性。本文先阐述其机械、电气及辅助结构与运行特性，剖析整流、逆变侧差异化控制原理与保护联动逻辑，梳理机械、电气、控制三类典型故障成因与系统危害，针对性提出分级排查方法、常态化运维及智能预警优化策略，可为换流变分接开关安全稳定运行提供技术参考。

关键词：换流站；换流变分接开关；控制原理；故障

引言：高压直流输电凭借输电距离远、容量大的优势，成为跨区域电力输送的核心方式，换流变作为关键枢纽设备，其运行稳定性直接决定直流系统工况。分接开关承担换流变变比调节、电压稳定的核心作用，长期高频带负荷运行，易出现机械磨损、电气异常及控制失准等故障。为保障直流输电安全高效运行，本文系统解析其结构特性、控制逻辑，深究故障机理并优化运维方案，助力设备隐患防控与系统稳控。

1 换流站换流变分接开关结构与工作基础

1.1 分接开关整体结构组成

(1) 机械结构由调压绕组、选择开关、过渡电阻及传动机构四部分构成。调压绕组提供档位抽头，选择开关完成档位切换，过渡电阻在切换过程中限制环流，传动机构通过齿轮与连杆系统驱动动作执行。(2) 电气结构包含控制回路、驱动回路与信号采集回路。控制回路接收调控指令并逻辑判断，驱动回路输出电机或电磁铁操作能量，信号采集回路监测位置状态与电气量，形成闭环调控链路。(3) 辅助结构涵盖绝缘油系统、密封装置及位置检测装置。绝缘油系统兼具绝缘与散热功能，密封装置确保切换时内部油室与外界的隔离，位置检测装置通过机械联动触点或光电编码器实时反馈档位信号。

1.2 有载分接开关基本工作特性

(1) 带负荷调压依靠过渡电阻实现无间断切换。切换过程中，过渡电阻短时接入，限制循环电流，确保负荷电流不中断，完成从当前档位到目标档位的平稳过渡。(2) 档位调节范围由调压绕组抽头匝数决定，换流变通常设粗调与细调双区结构。变比调节特性呈阶梯式线性变化，步长固定，满足电压精细调节需求。(3) 动作时序涵盖触发、储能、切换、复位四个阶段，全过程持续时间约50~100ms。运行速率由传动机构速比驱动电机转速决定，通常设定为恒定切换速度，以减小暂态

冲击^[1]。

1.3 换流变分接开关运行工况特点

(1) 整流侧分接开关配合定触发角控制，调变比维持直流电压恒定；逆变侧配合定熄弧角控制，交流电压波动时调变比保障换相裕度。两侧控制目标不同，动作频次与调节方向差异显著。(2) 电压骤降、负荷突增等扰动下，分接开关需快速响应。频繁动作加剧机械磨损、油温升高，对操作机构可靠性及过渡电阻热容量要求更高，需兼顾响应速度与动作寿命。(3) 与普通变压器相比，换流变分接开关调节频次高、单次精度细，且需与阀控系统协调。普通变压器调压基于长时间电压偏差，而换流变分接开关响应直流输电快速功率调控，常配置双部分接开关协同工作，以扩大调节范围并降低动作负担。

2 换流站换流变分接开关控制原理与逻辑机制

2.1 控制系统整体架构

(1) 极控系统与分接开关电控系统构成协同控制架构。极控系统根据直流输电运行工况生成电压参考值与档位调节指令，电控系统作为执行层接收指令并驱动开关动作，两者通过硬接线与现场总线双重通道实现信息交互，确保控制指令的可靠传输与执行。(2) 控制系统分为信号采集、逻辑运算与执行输出三级体系。信号采集层完成电压、电流、触发角及档位状态等物理量的实时检测与转换；逻辑运算层依据采集信息与预设控制策略进行阈值比较与调节量计算；执行输出层将运算结果转化为驱动电机或电磁铁的动作脉冲，三级协同实现控制闭环^[2]。(3) 系统设置手动与自动双模式切换机制。正常运行采用自动模式，由极控系统依据直流控制目标自主调节档位；检修或特殊工况下切换为手动模式，运行人员通过就地或远方操作终端发出升降档指令，双模式切换具备权限管理与互锁保护功能。

2.2 核心控制原理

(1) 整流侧采用定触发角控制方式。控制系统检测整流侧触发角当前值,与整定值比较后生成偏差信号,依据偏差方向与幅值发出升档或降档指令,通过调节换流变压器变比使触发角维持在设定范围,从而稳定直流电压输出。(2) 逆变侧采用定熄弧角或定直流电压控制方式。定熄弧角控制以熄弧角测量值为反馈量,通过调整分接开关档位补偿交流系统电压波动,确保换相裕度充足;定直流电压控制则以直流线路电压为被控量,配合整流侧调节共同维持直流系统功率平衡。两种方式依据运行工况自动切换。(3) 空载调压阶段分接开关在换流阀未解锁时动作,控制目标为建立期望空载电压,动作允许频次较高;解锁运行阶段分接开关与阀控系统协同,动作需满足直流功率调节速率要求,且单次动作后须经一定延时方可再次操作,以避免频繁调节引发系统振荡。

2.3 控制逻辑与动作流程

(1) 逻辑运算单元将实测电压、触发角或熄弧角与设定值比较,当偏差量超出预设死区阈值且持续时间满足延时条件时,判定为有效调节需求。阈值设定兼顾调节灵敏度与抗扰动能力,死区范围依据系统容量与控制精度要求整定。(2) 判定升档或降档需求后,控制主机生成带时标与优先级标识的指令,经协议转换后通过现场总线或硬接线接口传输至电控系统执行单元。指令传输配置双重校验机制,防止误码导致误动作。(3) 分接开关动作到位后,位置检测装置将档位信号反馈至极控系统,与原始指令进行一致性比对。若档位与指令吻合则闭环结束;若出现拒动、滑档或越档等异常,系统启动重试或报警流程,同时将偏差信息计入控制日志以备分析^[3]。

2.4 控制保护联动机制

(1) 控制系统实时监测分接开关回路电流及过渡电阻温升,当检测到切换电流越限或过载持续时间超出耐受值时,保护逻辑立即触发闭锁,禁止后续动作指令输出,同时发出告警信号通知运行人员处置,防止设备热损坏。(2) 控制系统配置档位异常与通讯故障监测模块。档位信号跳变、编码器故障或相邻档位同时导通等异常状态下,保护逻辑判定为严重故障并联动闭锁;控制系统与极控系统间通讯中断超时后,电控系统自动保持当前档位并切换至就地控制模式。(3) 换流阀闭锁、交流系统失电或直流线路故障等紧急工况下,分接开关接收极控系统发出的紧急闭锁指令,立即中止当前动作流程并锁定操作机构。待系统故障排除且收到复位信号

后方可恢复正常操作,紧急闭锁优先于所有手动及自动指令,确保设备安全。

3 换流站换流变分接开关典型故障分析与运维优化

3.1 典型故障类型及成因分析

(1) 机械故障以传动卡涩、档位打滑及机构磨损最常见。传动卡涩因轴承锈蚀、润滑油干涸结块或金属碎屑积聚,表现为力矩增大、动作不到位,严重时电机过载停转。档位打滑源于定位弹簧疲劳、棘轮齿面磨损或锁止销松动,锁定不可靠,负荷电流下触头振动致档位跳跃。机构磨损集中于触头电弧烧蚀、过渡电阻热冲击微裂纹及凸轮轮廓磨损,呈累积性损耗。(2) 电气故障含控制回路断线、接触不良及绝缘击穿。断线多由振动致接线端子松动、线芯疲劳断裂或继电器触点烧毁,使指令无法传输。接触不良集中于主触头与过渡触头,氧化膜增厚或弹簧压力衰减后接触电阻升高,切换时局部发热。绝缘击穿常因绝缘油受潮、杂质增多或局部电场集中,初期析出特征气体,后期发展为贯穿性故障^[4]。

(3) 控制故障分档位失步、调节异常及指令拒动或误动。失步源于编码器供电波动、码盘受油污或电磁干扰致脉冲计数偏差,显示档位与实际位置偏差累积。调节异常表现为超调大、振荡或响应滞后,根源为PID参数不适配或死区过窄。指令拒动涉及驱动电源失压、电机热保护或光耦损坏;指令误动由电平漂移、接地不良共模干扰或相邻回路耦合所致。

3.2 故障危害与工况影响分析

(1) 分接开关单设备故障直接影响换流变调压能力与安全运行。档位卡阻导致换流变阀侧电压无法调节至目标值,整流侧触发角偏离最优运行区间,绕组安匝分布失衡引发局部漏磁与温升超标。切换过程中过渡电阻烧损或灭弧失败时,电弧在油室内持续燃烧,高温高压可能造成开关外壳爆裂并引发换流变本体短路事故。

(2) 分接开关异常引发的直流系统功率波动具跨站传播特性。档位突变使变比阶跃变化,直流电压产生尖峰扰动,功率振荡沿线路向对站传播,两侧控制响应可能反向调节加剧振荡。调节严重滞后使电压偏差无法及时消除,极控系统可能判定调压失效而启动紧急移相或闭锁。误发升降档指令使直流电压偏离额定值,无功失衡波及交流母线电压,保护系统面临误动风险。(3) 长期故障隐患潜伏期长、突发性强。触头每次切换产生微米级烧蚀,累积至临界值后接触电阻跃升,焦耳热加速绝缘油分解,乙炔、乙烯持续攀升。过渡电阻受大电流冲击后阻值漂移,切换时两支路电流分配不对称形成正反馈。若不通过定期油色谱追踪捕捉,最终发展为触头熔

焊、绝缘筒贯穿性碳化或油箱内部燃爆，导致换流变非计划停运与重大经济损失。

3.3 故障排查与处理方法

(1) 机械类故障检测执行外观排查、特性测试、分解检修三阶段流程。外观排查检查传动销有无脱出、齿轮箱焊缝是否渗漏、箱体内部有无碎屑及熏黑痕迹。特性测试使用专用仪驱动开关全程动作，采集电机电流波形与切换时间，与标准曲线对比判定卡阻点或时序异常。分解检修针对故障部位更换磨损齿轮轴承、清理轨道毛刺、打磨触头并调整定位机构，装配后完成至少五个完整循环的电动操作验证。(2) 电气回路故障排查遵循电源确认、信号追踪、执行测试三段路径。确认控制母线电压正常后，逐级检测编码器输出脉冲、位置触点通断及继电器励磁信号，重点查验插接件接触电阻，发现问题后清洁或更换接插件。执行段测试控制主机至电机端子全程导通性，绝缘电阻不合格时排查中间接头或穿管磨损点。修复后实施全档位升降往返传动试验，确认控制显示与机构实际档位严格同步。(3) 控制逻辑故障校验采用仿真重现与录波比对联合作业。将故障时刻控制参数与动作时序载入离线仿真平台复现，逐语句跟踪逻辑判断过程定位阈值设定错误、延时环节异常或逻辑门翻转故障。通过故障录波提取偏差输入、调节器输出及档位反馈时序，与标准动作图重叠比对。参数修正采用工程整定法重新计算比例增益与积分时间，调整偏差死区与动作延时，修正后完成阶跃扰动测试与遍历测试确认调节品质达标^[5]。

3.4 日常运维优化与故障预防策略

(1) 常态化运维涵盖标准化巡检、周期性油质检测及精细化机构养护。巡检按半月执行作业卡，监听动作声音有无冲击，观察油位随温度变化是否正常，红外测温扫描连接点温度分布。油质检测按季度开展击穿电压、微水及溶解气体全分析，建立特征气体纵向趋势曲线，发现乙炔增长率突增时加密检测。机构养护纳入年度检修，清洗换脂、打磨触头涂敷导电膏、更换老化密封圈，养护影像记录确保可追溯。(2) 控制参数优化依托动作大数据分析。统计月度动作次数与各档位

驻留时间，识别动作集中档位后适当放宽该区段偏差死区，滤除微小波动引起的不必要调节，在电压精度与机械寿命间取得平衡。控制系统嵌入单位时间最大动作次数硬约束，达到限额时执行闭锁并推送预警。每年结合系统阻抗实测值校核保护定值，确保过流定值与延时匹配当前工况，避免参数老化造成误闭锁或拒动。(3) 故障预警机制依托多源在线监测构建分级预警模型。采集驱动电机三相电流波形、本体多点温度、切换过程振动频谱及油中溶解氢在线含量。基于历史样本建立正常运行包络区间及注意、异常、严重三级阈值。实时数据跨入注意级时推送关注提示，达异常级时关联历史案例库推送原因与检查建议，达严重级时触发告警建议停运。该体系推动运维从计划检修向差异化状态检修升级，有效降低非计划停运风险。

结束语

本文全面梳理了换流变分接开关的结构基础、核心控制原理与保护机制，明确了各类典型故障的诱发因素、扩散危害及精准排查方式。结合换流站特殊运行工况，提出了标准化巡检、参数优化及多源监测预警的运维优化体系。有效解决了分接开关高频运行下可靠性不足的问题，对降低设备故障跳闸率、延长设备使用寿命、提升直流输电系统整体运行稳定性具有重要的工程实践意义。

参考文献

- [1] 杨勇,张晴晴,王俊棚,刘晓龙.换流变压器分接开关控制原理及优化建议[J].电力工程技术,2024,43(02):89-94.
- [2] 石丹丹,宗凡琪,杨韦国. $\pm 800\text{kV}$ 换流变分接开关控制原理及典型故障分析[J].电工技术,2023,13(18):102-105.
- [3] 闫晨光,张芑,徐雅,武炬臻,李凌南.换流变压器有载分接开关级间短路故障特性与保护优化[J].电工技术学报,2022,37(21):112-120.
- [4] 马玉龙,王鑫,李刚.特高压直流换流变分接开关动作异常故障溯源分析[J].电网技术,2023,47(09):3210-3217.
- [5] 李昊,陈晨.高压直流换流变有载分接开关控制逻辑缺陷及故障治理[J].电力设备管理,2025,20(06):76-79.