

LF炉冲击负荷下35kV SVC无功补偿系统故障分析与运维对策

姚志震

河南安钢周口钢铁有限责任公司 河南 安阳 455000

摘要: LF炉冶炼产生的冲击负荷易引发35kV SVC无功补偿系统故障,造成电压闪变、谐波超标及电网振荡等问题。本文简述SVC系统工作原理,统计设备硬件、控制采样及系统运行三类典型故障,结合仿真验证剖析故障演化机理与诱因。从常态化运维、应急处置、参数优化及管理升级多维度制定防控对策,可有效降低设备故障率,提升系统补偿稳定性与区域电网供电质量。

关键词: LF炉冲击负荷; 35kV SVC无功补偿系统; 故障分析; 运维对策

引言: 钢铁行业LF炉冶炼工况具有非线性、强冲击负荷特性,会导致供电母线电压波动、谐波畸变等电能质量问题。35kV SVC系统是抑制负荷扰动、无功补偿和谐波治理的核心设备,但长期受频繁冲击负荷影响易频发故障,制约冶炼生产与电网安全。为解决现场运维短板,本文针对性开展故障机理分析,结合仿真试验验证问题根源,优化运维体系与控制策略,为工业SVC系统稳定运行提供技术参考。

1 LF炉冲击负荷与35kV SVC系统工作原理

1.1 LF炉冲击负荷特性分析

(1) LF炉冶炼周期内,电极电流随熔化、升温、精炼阶段呈现剧烈波动,尤其在电弧点燃和电极调节初期,产生数倍于额定电流的脉冲式冲击,形成典型非线性、时变性的快速负荷扰动。(2) 冲击性无功功率骤变引发母线电压闪变,幅值可达额定电压的5%~8%;电弧电阻的非线性畸变产生2~7次谐波电流,以3、5次最为突出,恶化电能质量,干扰同母线其他敏感设备稳定运行。(3) 快速负荷波动通过线路阻抗传递至35kV供电母线,造成母线电压瞬时跌落与相位跳变,引发公共连接点(PCC)功率因数剧烈波动,严重时诱发供电系统低频振荡,威胁区域电网安全运行。

1.2 35kV SVC无功补偿系统结构组成

(1) SVC主回路采用晶闸管控制电抗器(TCR)与滤波电容器组(FC)并联结构,TCR通过反并联晶闸管调节触发角连续改变等效感抗,FC支路兼作特定次谐波低阻通道,核心模块包含晶闸管阀组、串联电抗器、阻尼电阻及高通滤波器。(2) 控制系统基于数字信号处理器(DSP)实现瞬时无功检测与触发脉冲生成,采样系统实时采集母线电压、电流信号,经锁相环同步后计算无功功率与谐波含量,保护系统配置过流、过压、晶闸管过热及触发失败

等多重闭锁保护^[1]。(3) 35kV等级下SVC额定补偿容量通常为8~20Mvar,晶闸管阀组串联数及冷却方式依据母线短路容量设计,FC滤波支路调谐频率精确匹配5、7次特征谐波,避免与电网发生并联谐振。

1.3 SVC系统无功补偿工作原理与运行机制

(1) SVC通过调节TCR支路吸收的无功功率,动态跟踪负荷变化,实现母线电压平滑调节,同时FC支路为谐波提供低阻抗入地通道,兼具基波无功补偿与滤波双重功能,有效抑制电压闪变。(2) 冲击负荷发生时,采样系统检测到母线电压跌落与无功骤增,控制系统在半个工频周期(10ms)内增大晶闸管触发角,减少TCR吸收无功,等效增加容性输出,迅速抬升电压,调节过程随负荷变化持续闭环追踪。(3) SVC正常运行判定标准包括:母线电压偏差不超过额定值的±3%,功率因数稳定在0.92~1.0区间,各滤波支路电流不超过额定值,晶闸管阀组结温维持在允许范围,响应时间小于20ms,谐波畸变率满足国标要求。

2 LF炉冲击负荷下35kV SVC无功补偿系统典型故障及机理分析

2.1 现场典型故障统计与分类

(1) 设备硬件故障集中表现为滤波电容器组介质击穿或元件鼓包泄漏,电抗器绕组匝间绝缘劣化致局部过热烧毁,TCR晶闸管阀组因承受过高dv/dt或浪涌电流发生永久性击穿短路,快速熔断器在重复过流冲击下金属疲劳熔断,此外水冷系统管路堵塞或水泵失效引发功率组件超温损坏亦频繁记录在案。(2) 控制与采样故障主要包括强电磁干扰环境下电压/电流互感器二次信号畸变,致使控制器误判负荷状态而输出错误触发角;控制器内部看门狗程序跑飞或FPGA逻辑错误引发脉冲时序紊乱;光纤通讯链路受连接器污染或光功率衰减导致触发

脉冲丢帧,造成晶闸管误导通或半波运行,严重时引起阀组不对称导通产生直流偏磁^[2]。(3)系统运行故障体现为动态补偿效果劣化致母线电压偏差持续超越额定值的 $\pm 3\%$ 范围,滤波支路频率特性偏移使注入电网谐波电流超过国标限值,冲击负荷瞬间无功骤变超出SVC调节容量导致功率因数跌破0.9考核下限,多重异常叠加触发综合保护装置过流、过压或谐振动作而跳闸退出,甚至引发全站停电事故。

2.2 核心故障诱因及机理分析

(1)频繁冲击负荷使晶闸管承受周期性热循环,焊层蠕变疲劳致热阻上升、结温逼近极限;电容器在谐波电压下介质损耗增大,局部放电起始电压逐年下降,绝缘降解后击穿场强低于工作场强;电抗器绕组受动态电磁力引起匝间微动磨损,高频趋肤效应下发热剧增,热老化速率指数上升。(2)滤波支路与电网等效电感构成多阶谐振网络,当冲击电流中某次谐波接近系统固有频率时,回路阻抗骤增,谐波电压放大至额定值数倍,引发电容器过流、电抗器磁饱和及保护误动。尤其系统运行方式变化导致短路容量改变时,谐振点漂移,使原调谐准确的支路落入谐振区,造成突发过电压损坏^[3]。

(3)SVC基于瞬时无功理论的检测算法存在固有延时,LF炉电极在熔化期大幅阶跃扰动时,补偿量计算值与实际需求存在相位偏差,触发角调节持续滞后,使系统在过补与欠补间反复交替,形成增幅性无功振荡。振荡幅度超出晶闸管导通角线性区间后,系统失稳,最终因电压跌落或无功失衡触发低电压保护。

2.3 故障影响因素与故障演化规律

(1)运维管理中滤网堵塞致散热风量下降、晶闸管导通压降在线监测缺失、滤波电容器未定期进行介损及电容量测试等因素加速性能劣化;外部强雷电或操作过电压侵入损坏阀组,系统阻抗参数整定未随电网方式调整使保护定值与实际工况失配;环境温度超过40℃时功率组件散热裕度不足,触发过热降容运行,补偿能力进一步削弱。

(2)单一滤波电容器容量衰减使该支路谐振频率偏移,滤波效果减弱导致母线谐波电压升高,加速同一组内其他电容器劣化,进而TCR为抑制电压波动频繁大幅调节,产生额外谐波注入,恶性循环最终造成滤波器整体退出、SVC容量不足,继而引发系统电压崩溃。该演化过程通常经历性能缓慢退化期(数月)和突发失效期(数分钟)两个阶段^[4]。(3)冲击电流幅值为额定值3倍以下时,SVC经闭环调节可恢复稳定,故障概率低于5%;3~5倍时晶闸管结温逼近安全限值、电容器过电压倍数超过1.1倍,故障概率升至20%~30%;超过5倍时保护系统大概率动作跳

闸,且伴随功率器件不可逆损坏,严重程度呈指数增长,修复周期和更换成本显著上升。

2.4 故障案例仿真与验证分析

(1)基于PSCAD/EMTDC搭建LF炉电弧阻抗非线性时变模型与35kV SVC电磁暂态仿真平台,变压器阻抗、滤波支路调谐频率、TCR触发角限值等关键参数与实际工程一致,以现场故障录波数据作为扰动激励源输入,仿真步长设为50 μ s以精确捕捉谐波细节。(2)设置滤波电容器击穿、支路失谐、晶闸管触发脉冲丢失三类典型场景,仿真获得母线电压骤降深度、谐波频谱分布、TCR电流畸变波形,准确复现故障前后无功功率跃变及电压闪变特征,复现出的5次谐波放大倍数达4.2倍,与现场记录高度吻合。(3)将仿真输出的电压畸变率、响应超调量、谐波放大倍数等定量指标与现场录波对比,各特征量误差均控制在 $\pm 8\%$ 以内,且故障时刻波形变化趋势一致,验证了模型参数的有效性,证明故障机理分析结论具备工程可信度,可用于后续预测与预警研究。

3 LF炉冲击负荷下35kV SVC无功补偿系统针对性运维对策与故障防控优化方案

3.1 设备常态化运维体系优化

(1)分级定期巡检制度:日常巡检每个工作日执行,涵盖设备外观完好性、运行温度、异常噪声振动及冷却系统循环状态;专项巡检每月开展,重点进行滤波电容器电容量比对测量、电抗器红外热成像扫描及晶闸管阀组导通压降抽检;年度大修结合系统停电计划,完成滤波器失谐度全面校验、保护装置定值复核、水冷系统管路清洗及功率单元全面解体检修。(2)核心元器件在线监测:电容器采用介损在线监测与电容量周期性跟踪比对,当电容量偏差超过初始值 $\pm 5\%$ 即发出预警信号;晶闸管通过实时监测每个阀组的导通压降和漏电流变化趋势评估芯片健康度,结温通过内置热敏电阻连续监测;电抗器绕组采用光纤测温实时监控热点温度,结合振动频谱分析判断绕组压紧状态及匝间绝缘磨损程度。

(3)基于设备历史运行数据和劣化曲线建立寿命预测模型,对电容器剩余寿命低于3个月、晶闸管热阻上升超过初始值20%的情形实施预防性更换;编制年度备件轮换计划,在LF炉检修窗口期提前替换接近寿命末期的核心组件,避免运行中突发失效。

3.2 故障快速处置与应急运维策略

(1)典型故障快速排查流程:电容器击穿时依据差动保护信号锁定故障支路,采用绝缘摇表和电桥法快速确认击穿元件;晶闸管损坏通过触发脉冲反馈和阀组压降测量定位故障阀组;控制采样异常依次检查互感器二

次回路、采集板卡输入通道及光纤链路衰减,采用分段隔离法逐级排除。(2)故障现场应急处置执行“先隔离、后排查、再恢复”原则,单支路故障立即将该滤波支路退出运行并安全隔离;可复位类故障(控制器死机、通讯中断)执行系统重启复位;硬性故障(电容击穿、晶闸管短路)启动抢修流程,更换备件后经绝缘测试和触发试验合格方可并网恢复^[5]。(3)故障复盘实行72小时内召开分析会制度,查明直接原因与根本原因并形成报告;建立问题台账与整改措施清单,明确责任人与完成时限;每月统计分析故障类型与频次分布,跟踪整改落实效果,确保同类问题重复发生率持续下降。

3.3 系统运行参数与控制策略优化

(1) SVC保护定值优化整定:依据冲击负荷实测波形调整过流保护动作时限,由固定延时改为反时限特性以有效避开尖峰脉冲扰动;电容器过压保护从1.1倍额定值调整至1.15倍并延时至100ms,防止瞬时谐振尖峰误动;电压闪变保护增设电极切换期间的短时屏蔽逻辑,自动放宽偏差阈值。(2)控制算法优化:引入基于负荷变化率的前馈补偿环节,当LF炉电流变化率超过阈值时预判无功需求并超前调节;将传统PI控制升级为模糊自适应PID,动态调整增益参数以匹配不同冲击强度,将响应时间缩短至15ms以内,有效减小超调量。(3)谐波抑制与谐振防控:滤波支路增设阻尼电阻以降低谐振峰值增益;增设5、7次谐波实时监测通道,当检测到某次谐波异常增长时主动调整TCR触发角以改变等效阻抗、使谐振频率偏移至安全范围;配置有源滤波器作为辅助补偿手段,对残余谐波实施定向抵消。

3.4 运维管理体系升级与效果验证

(1)智能化运维监控系统:基于边缘计算与云平台构建设备状态在线监测平台,接入电容器介损、晶闸管结温、谐波畸变率、触发角波动等关键参数,设置注意、异常、告警三级预警阈值,实现故障前特征智能识

别与早期预警,提前24小时推送潜在风险信息。(2)运维人员专项技能培训:编制SVC系统运维标准化作业指导书(巡检标准、操作流程、应急处置三册);每季度开展晶闸管更换、滤波器调谐试验、控制器参数整定等实操演练;每年组织模拟冲击故障的全流程联合反事故演习,提升团队协同处置能力。(3)优化方案应用效果评估:建立投运前后故障率对比统计台账,按季度追踪设备月均故障次数、平均修复时间、非计划停机时长、电能质量合格率等关键指标;半年周期开展综合效果评估,预期设备故障率下降40%以上,平均修复时间缩短至4小时以内,电压合格率稳定在99.5%以上,验证优化方案实际成效并持续迭代改进。

结束语

本文系统分析了LF炉冲击负荷下35kV SVC系统的各类故障特征与演化规律,明确了负荷扰动、谐振干扰、控制滞后及运维疏漏的核心致因。通过优化运维体系、升级控制算法、整定保护参数等针对性举措,可有效改善系统补偿性能、抑制谐波谐振、降低设备故障概率。研究成果可切实解决现场实际问题,为同类工业冲击负荷下SVC系统故障防控与高效运维提供借鉴。

参考文献

- [1]王梓萌.SVC动态无功补偿装置的运行维护与管理[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(1):112-117.
- [2]刘晓梅,李娟.高压SVC动态无功补偿装置故障案例分析与处理[J].电力科学与技术学报,2023,38(2):89-94.
- [3]任杰,沈欣,韩煦.35kV高压无功补偿装置故障分析及运维优化[J].电世界,2025,66(6):53-56.
- [4]刘海峰,孙志刚.电弧炉/精炼炉冲击负荷对电网电能质量的影响及治理[J].电力系统保护与控制,2021,49(12):67-72.
- [5]张磊,陈凯.冶炼企业35kVSVC系统常见故障及运维改进对策[J].电工技术,2024,23(18):156-158.