

基于整流变压器无功补偿技术研究

焦利军

(陇南师范学院,甘肃省陇南市,742500)

摘要 整流变压器作为工业供电核心设备,其无功损耗会降低能源利用效率,研究无功补偿技术的意义重大。本文深入解析静态、动态、混合补偿体系的核心机制。针对补偿精度与负荷特性的适配矛盾、系统稳定性与控制复杂度的平衡难题及极端工况适应性局限,提出拓扑优化、算法融合、工况强化的应对策略。通过分层响应拓扑、多算法协同控制、三维保障体系,实现补偿效能与系统稳定性的协同提升,为非线性负荷电网的无功治理提供技术参考。

关键词 整流变压器;无功补偿技术;挑战;对策

中图分类号:TM421 文献标识码:B

文章编号:1008-0899(2026)04-0041-03

整流变压器的无功损耗会加剧电网电压畸变,使能源利用效率降低,故无功补偿技术的研究意义尤为显著。当前,静态补偿存在响应滞后问题,动态补偿遇到成本壁垒,混合补偿陷入协同困境,而整流负荷的非线性、冲击性更放大了技术矛盾。基于此,本文从关键技术解析切入,剖析挑战,构建“拓扑-算法-工况”应对体系,为相关技术应用提供理论和路径支撑。

1 整流变压器无功补偿关键技术

1.1 静态无功补偿技术体系

静态无功补偿技术以固定容量调配和分组投切逻辑为核心架构,其技术基底在于“容性-感性”无功的阶梯式平衡。电容-电感补偿装置通过预设多组电容/电感单元,依据整流变压器的实时无功需求进行组合投切,投切执行元件(如真空接触器或高压断路器)的动作逻辑需与变压器负荷变化趋势形成“预判-响应”联动,避免投切滞后引发的功率因数波动。

晶闸管控制电抗器(TCR)的技术内核体现在

基金项目:2023年陇南市强科技计划项目

项目名称:甘肃成州锌冶炼厂整流变压器的无功补偿技术研究(2023-S·QKJ-31)。

作者简介:焦利军(1988~),男,甘肃陇南人,本科,讲师,研究方向:电气自动化。

“触发角调制+阻抗动态变换”的协同。通过改变晶闸管的导通相位角,可连续调节电抗器的等效感抗,进而实现感性无功的平滑输出。其与固定电容器(FC)构成的复合拓扑,需通过“感性-容性”无功的矢量叠加算法,消除整流变压器换相过程中产生的无功冲击。此外,TCR的过电流保护机制需与变压器保护系统形成硬接线和软通信的双重联动,防止晶闸管过负荷导致的装置损坏^[1]。

1.2 动态无功补偿技术演进

动态无功补偿技术的核心在于瞬时检测和实时响应的闭环控制,静止无功发生器(SVG)通过电压型变流器拓扑实现无功的双向连续调节。其直流侧储能单元(如电解电容或超级电容)的电压稳定控制是技术关键,需通过直流电压外环与电流内环的双环调节,抑制电网电压波动对无功输出精度的影响。

瞬时无功检测算法(如改进p-q法或 α - β 变换法)需具备谐波免疫特性,通过傅里叶变换或小波分解分离基波无功分量,避免整流变压器非线性负荷产生的谐波干扰检测精度。链式SVG的模块化设计中,子模块的均压控制采用电容电压排序、冗余均流策略,通过光纤同步触发信号确保各模块功率输出的一致性,在模块故障时可自动重构拓扑结构,维持补偿系统的连续运行。

1.3 混合补偿技术融合路径

混合补偿技术通过静态粗调和动态精调的分层控制,实现无功补偿的“效率-精度”双优。“固定

电容器(FC)+SVG”的组合方案中,FC承担整流变压器的基波无功补偿,其容量配置需覆盖变压器额定负荷下的70%~80%无功需求,SVG则负责抵消负荷波动产生的动态无功偏差,二者的切换阈值需通过功率因数窗设定(如0.92~0.98),避免频繁切换导致的装置疲劳。

晶闸管投切电容器(TSC)和TCR的协同控制依赖逻辑互锁、时序配合。TSC通过晶闸管的过零触发实现容性无功的无涌流投切,TCR则通过连续调节感性无功补偿剩余偏差,二者的无功输出需通过矢量运算形成互补关系,消除整流变压器空载-满载切换时的无功突变^[2]。此外,混合系统的监控单元需具备多装置状态融合、故障自愈功能,确保任一组件异常时可快速切换至冗余运行模式。

2 整流变压器无功补偿面临的挑战

2.1 补偿精度与负荷特性的适配矛盾

整流变压器的非线性负荷(如整流桥换相过程)会产生时变和非正弦的无功需求,传统基于基波分量的补偿算法难以精准跟踪。当负荷电流含大量谐波时(如6脉波整流产生的5次、7次谐波),无功检测算法易出现谐波误判,导致补偿量偏离实际需求,甚至放大电网畸变率。此外,整流变压器的“空载-满载”切换过程中,无功需求的突变幅度可达额定值的30%~50%,现有补偿装置的响应延迟(静态装置约20~50ms,动态装置约5~10ms)会造成短暂的补偿缺口,引发电压波动或闪变。

2.2 系统稳定性与控制复杂度的平衡难题

系统稳定性与控制复杂度的平衡难题,体现在多补偿装置协同与电网动态响应的交互中。为提升补偿效能,常采用分层控制架构(如集中决策+就地执行),但控制逻辑的层级嵌套可能增加信号传输延迟。若控制参数整定不当(如PI调节器比例系数失衡),可能诱发补偿装置与电网的谐振,或导致动态调节超调,反而破坏系统电压稳定裕度^[3]。此外,多目标优化(如兼顾无功补偿与谐波抑制)会进一步提升算法复杂度,增加控制失配风险。

2.3 极端工况下的适应性局限

极端工况下的适应性局限,暴露了补偿装置环境耐受阈值与工况严苛性的冲突。在高谐波污染(如电弧炉整流侧)场景中,补偿电容容易与系统电感形成谐波放大回路,导致设备过电压。而高温、高

湿度环境(如化工整流车间)会加速绝缘老化,削弱装置长期运行可靠性。当遭遇电网电压骤降等扰动时,补偿装置的快速保护机制可能与无功支撑需求产生矛盾,陷入保护误动或过载损坏的两难境地^[4]。

3 整流变压器无功补偿技术的应对策略

3.1 拓扑结构的优化升级

对拓扑结构进行优化升级,需要打造模块化、可扩展的弹性架构,以应对整流系统多变负荷与复杂电网的双重挑战。基础框架可采用五电平混合链式拓扑,将静态补偿模块组(含自愈式电容器、串联电抗器)与动态调节模块组(由MMC子模块、IGBT驱动单元构成)通过智能交互接口(内置高速数据总线、状态监测芯片)实现互联。静态模块组按负荷区间划分若干子单元,每个子单元配置独立投切开关,如磁保持继电器,可根据基波无功需求量进行阶梯式投切;动态模块组则通过子模块级联实现连续调压,在负荷冲击瞬间(如电机启动或轧机咬钢),子模块内的电容电压均衡算法迅速响应,通过电平叠加抵消无功波动。拓扑中嵌入的自适应滤波网络需采用混合滤波拓扑,无源LC支路(针对3次、5次谐波)与有源滤波桥臂(覆盖2~50次谐波)形成协同滤波机制,有源部分通过谐波电流检测算法实时追踪畸变分量,经脉冲宽度调制生成反向电流注入电网。此外,拓扑重构单元(含冗余模块库、快速切换开关)可在模块故障时触发热备用切换,如星型接线某相模块失效,立即切换至三角形冗余支路,并通过接口协议转换维持与控制系统的通信,确保补偿中断时间控制在毫秒级以内,避免影响整流系统稳定运行。

3.2 智能控制算法的深度融合

智能控制与算法的深度融合,需要构建“感知-分析-决策-执行”的全链路智能体系,突破传统控制响应滞后与精度不足的瓶颈。前端部署多维传感集群,包含光纤光栅阵列(监测绕组温度场、振动频谱)、霍尔传感器组(采集三相电流瞬时值、电压畸变率)及环境传感器(捕捉温湿度、粉尘浓度),各类数据经边缘预处理单元(含噪声过滤算法、特征提取模块)转化为标准化状态向量。核心决策层采用深度置信网络(DBN)、模型预测控制(MPC)的混合架构,DBN通过多层神经元映射挖掘负荷波动特

征,如整流触发角变化规律、电流谐波含量与负荷的关联,生成补偿需求预判曲线;MPC则基于滚动优化窗口,长度可动态调整,在约束条件集(含装置容量上限、电网电压偏差阈值)内求解最优控制量。针对复杂工况切换,如电解槽从预热到正常运行,引入强化学习探索机制,算法通过“试错-反馈”迭代优化控制参数矩阵,如动态调整PID调节器比例系数与响应带宽。同时,跨域知识迁移模块(整合同类整流系统历史数据、异行业适配规则)可缩短新场景下的算法收敛周期,配合分布式计算节点实现并行决策,确保在微秒级扰动如电网电压闪变时,控制指令能无延迟下达至执行单元。

3.3 工况适应能力的强化措施

工况适应能力的强化,需构建“硬件-软件-运维”三位一体的保障体系,以抵御极端环境与电网扰动的影响。硬件层面推行耐候性集成设计,电容器采用纳米复合介质,经真空浸渍工艺处理,提升高低温循环(-40~85℃)下的绝缘电阻稳定性;电抗器绕组选用玻璃丝包扁铜线,通过多层叠绕、浸漆固化增强机械强度,外层包裹硅橡胶护套抵御盐雾腐蚀。结构设计融入模块化快换理念,核心部件(如IGBT模块、滤波电容)采用卡扣式连接和导轨安装,配合防错插接口实现分钟级更换。软件层面开发工况自适应调节算法,当检测到电网三相不平衡度超标时,算法驱动分相补偿单元独立调节各相无功输出量,通过负序电流抑制策略平衡三相负荷;遭遇电压骤降时,能量缓冲模块(超级电容组)立即释放储能,维持补偿装置直流侧电压稳定。运维体系引入数字孪生技术,构建“物理设备-虚拟镜像”的实时映射。通过无线传感网络(采用LoRa或NB-

IoT通信协议)采集设备的运行参数(温度、振动、电压、电流)与环境参数,导入数字孪生平台生成三维动态模型。平台内置老化趋势预测算法,基于寿命损耗模型(如电容器的电压应力、温度循环次数)预判关键部件剩余寿命,自动生成预防性维护方案,如电容更换周期、开关动作次数预警。同时集成故障诊断专家系统,通过振动频谱分析、介损检测等手段识别潜在故障模式,如IGBT模块老化、电容器局部放电,并给出维修指导步骤,配合远程运维中心实现少人值守甚至无人值守。

4 结语

整流变压器无功补偿技术需兼顾效能提升与系统韧性。本文提出的分层拓扑突破传统局限,智能算法实现精准响应,工况措施强化环境耐受。三者协同形成的技术体系,能够化解负荷适配、稳定平衡等难题。未来可以探索多能互补储能与数字孪生运维的融合,推动补偿技术向更智能、更可靠的方向演进。

参考文献

- [1] 沈韦俊,谢伟,侯金彪,等.浅谈变压器试验过程应用高压无功补偿技术改造[J].中国设备工程,2023(z1):3-4.
- [2] 李旭雅,刘颂,左汉权.基于无功补偿技术在牵引变压器负载试验的失效分析及算法修正[J].电力设备管理,2023(21):130-132.
- [3] 杨文良,刘卓,窦冰杰,等.大型变压器空载和负载现场试验无功功率自补偿式电源的应用[J].内蒙古电力技术,2022,40(1):63-66.
- [4] 黎家明,霍群海,尹靖元,等.考虑柔性有载调压变压器的两阶段电压无功优化协调控制方法研究[J].电网技术,2025,49(1):272-283.