

基于继电保护技术的电气自动化系统设计研究

宗 文

江西赣能上高发电有限公司 江西 宜春 336400

摘 要：电气自动化系统的稳定运行高度依赖继电保护功能的精准支撑，针对当前部分场景下保护配置与自动化运行适配性不足、故障处置效率受限的实际问题，本文从需求梳理、架构搭建、核心模块开发与参数优化多个维度展开系统性设计，构建分层分布式的保护体系，兼顾速动性、选择性与可靠性要求，可有效缩短故障隔离时长，降低故障扩散风险，为工业级电气自动化系统的安全稳定运行提供可行的技术实现路径。

关键词：继电保护技术；电气自动化系统；分层分布式架构；整定优化；协同保护机制

引言：电力系统运行场景下，电气自动化设备的集成度与联动性持续提升，短路、过载、绝缘老化等故障引发的连锁停运风险也随之攀升。传统继电保护配置常存在参数适配性不足、多设备协同能力薄弱的短板，难以适配无人值守、远程管控的自动化运行要求。结合现场实际运行特性梳理保护设计边界，搭建适配性更强的继电保护支撑体系，对遏制故障范围扩大、保障非故障区域连续供电、提升全站运行管控效率有着重要的现实意义。

1 电气自动化系统继电保护设计需求与设计原则

1.1 电气自动化系统运行保护需求分析

电气自动化系统承担着电能传输、设备控制与稳定运行的核心功能，系统内发电机、变压器、断路器等关键设备长期处于带电运行状态，短路、过载、绝缘老化等故障随时可能发生。继电保护的首要需求，是在故障

出现的第一时间精准甄别异常工况，遏制故障范围扩大引发设备烧毁、电网震荡等严重后果。针对不同电压等级与负荷类型的差异化运行特性，需同步匹配分级响应的保护策略，避免通用配置无法适配特殊场景的问题^[1]。自动化场景下，系统集成度高、联动性强，单一点位故障易引发连锁反应，保护装置需快速切断故障回路，保障非故障区域持续稳定运行。同时，自动化系统依赖精准的信号传输与逻辑控制，继电保护需兼顾故障处理与运行监测，实时回传设备状态、故障参数，为系统运维提供可靠依据，满足无人值守、远程管控的自动化运行要求。

1.2 继电保护系统整体设计原则

继电保护系统设计需立足电气自动化系统运行本质，坚守安全性、可靠性、速动性、选择性核心准则，四大原则的核心要求、关键指标与实现要点如表1所示。

表1 继电保护核心设计原则精简明细

核心设计原则	核心要求	关键指标	实现要点
安全性	动作精准，无误动、拒动，规避保护失效风险	误动率 $\leq 0.01\%$ ，拒动率 $\leq 0.001\%$	多重闭锁、阈值冗余校验、硬件防误触
可靠性	软硬件稳定耐用，适配长期带电运行，故障可靠响应	平均无故障运行时间 $\geq 100000\text{h}$ ，适配 $-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ 环境	工业级器件选型、极端工况验证、软硬件冗余
速动性	毫秒级完成故障判断与切除，降低故障损害	主保护动作全时长 $\leq 20\text{ms}$ ，后备延时精准可控	高算力芯片、优先级任务调度、保护逻辑优化
选择性	精准定位故障，仅切断故障回路，保障非故障区供电	故障定位准确率 100%，无越级动作、无大范围停电	分层整定配合、多节点比对、区域协同闭锁

1.3 自动化场景下继电保护设计约束条件

自动化场景的运行特性，为继电保护设计划定了明确约束边界。系统智能化、集成化运行模式，要求保护装置具备通信适配能力，能与监控系统、PLC控制器无缝对接，实现数据实时交互与远程操控。需严格遵循行业通用通信规约完成接口开发，避免不同厂商设备对接

时出现数据丢包、指令延迟等兼容性问题。现场供电稳定性、电磁干扰环境直接影响保护装置运行，设计需强化抗干扰性能，优化接线布局与屏蔽措施，避免信号失真导致保护误判。同时，装置体积、安装空间、运维便捷性也是重要约束，需适配自动化柜内紧凑布局，满足后期调试、检修的实操需求。整定参数需结合自动化系

统负荷特性、运行逻辑精准设定,既不超出设备耐受阈值,也不影响系统正常启停与工况切换,确保保护功能与自动化运行流程适配落地。

2 基于继电保护技术的电气自动化系统整体设计

2.1 系统总体设计思路与架构搭建

以继电保护为核心支撑,电气自动化系统设计围绕安全运行、智能管控展开。整体思路以故障快速识别、精准隔离、稳定恢复为目标,整合保护、控制、监测、通信功能,形成分层分布式架构。各层级之间设置独立的物理隔离屏障,避免单一节点故障向上蔓延影响整体系统运行稳定性。系统自上而下分为现场执行层、保护控制层、监控管理层^[2]。现场执行层承载电流、电压采集及断路器操作,直接响应保护指令。保护控制层部署主保护与后备保护单元,完成故障判断与动作输出。监控管理层实现数据汇总、远程操作与事件记录,为运维提供直观支撑。架构搭建兼顾独立性与关联性,保护功能不依赖上层系统,确保极端工况下仍可独立动作,整体结构简洁清晰,适配工业现场长期稳定运行的要求。

2.2 系统硬件结构设计

硬件结构围绕继电保护核心需求配置,选用抗干扰能力强、响应速度快的工业级器件。电流互感器、电压互感器完成现场电气量采集,将强电信号转换为弱电信号送入保护装置。保护装置集成CPU、采样模块、出口回路,实现数据处理与逻辑判断。所有核心硬件器件均选用宽温型工业级产品,可在-40℃至85℃的环境温度区间内保持稳定运行状态。开关量输入输出模块连接断路器、隔离开关,完成跳闸、合闸指令执行。电源模块采用双路冗余供电,保障装置不间断工作。硬件布局遵循强弱电分离、屏蔽接地规范,削减电磁干扰影响。各模块接口标准化,便于安装调试与后期扩容,整体硬件结构紧凑可靠,支撑保护功能稳定落地。

2.3 系统软件框架设计

软件框架采用模块化设计,保障逻辑清晰、运行高效。数据采集模块实时获取电流、电压、开关状态等信息,完成滤波与精度处理。保护算法模块嵌入过流、速断、差动、过压等保护逻辑,按整定参数完成故障判定。各功能模块之间设置独立的运行优先级队列,核心保护进程独占系统资源,避免非必要任务抢占算力拖慢响应速度。逻辑控制模块接收保护信号,输出跳闸或告警指令。人机交互模块提供本地参数设置、状态显示功能。后台通信模块实现数据上传与指令下发。软件运行遵循实时操作系统机制,优先处理保护动作任务,确保毫秒级响应。程序设计预留调试接口,便于参数修改与

功能升级,整体软件框架稳定可靠。

2.4 系统通信架构设计

通信架构支撑系统数据交互与远程管控,采用双层网络结构。现场层采用工业现场总线,实现保护装置、采集模块、执行机构之间的近距离通信,传输速率稳定,抗干扰能力强。站控层采用以太网,连接保护装置与监控主机,实现大量数据高速传输。关键通信链路设置断点续传机制,临时网络中断恢复后可自动补传缺失数据,避免故障记录与运行参数出现遗漏。通信协议遵循电力行业标准,保证不同设备之间兼容互通。数据传输采用校验机制,提升传输准确性。通信链路配置冗余通道,避免单点故障影响整体通信。架构设计兼顾实时性与安全性,满足继电保护信息快速上传、控制指令及时下达的需求,为自动化系统协同运行提供可靠保障。

3 电气自动化系统继电保护核心模块设计

3.1 故障检测模块设计

故障检测模块承担电气运行参数实时采集与异常信号捕捉任务,是继电保护系统的感知前端。模块通过互感器获取回路电流、电压、相位及功率信号,对原始电气量进行滤波、放大与模数转换,剔除现场电磁干扰带来的信号畸变。检测逻辑按固定周期刷新运行数据,将实时值与额定阈值持续比对,识别过流、短路、过压、欠压、零序异常等典型故障特征。检测过程兼顾灵敏度与稳定性,轻微故障不遗漏,波动干扰不误判,为后续判别环节提供真实有效的数据支撑^[3]。硬件选用高精度采样芯片,保证信号采集精度,软件设置多级滤波算法,提升复杂工况下的检测可靠性,确保故障信号一经出现即可被准确捕获。

3.2 故障判别与定位模块设计

故障判别与定位模块以检测数据为依据,完成故障性质确认与区域判定。模块内置成熟保护算法,根据故障电气量变化速率、幅值特征区分瞬时故障与永久性故障,判断故障类型与严重程度。判别逻辑结合系统运行方式与保护整定值,按预设逻辑完成动作决策。定位功能通过多节点信息比对,确定故障发生在进线、母线、出线或设备本体,缩小故障影响范围。判别流程遵循优先级机制,主保护快速响应,后备保护延时跟进,避免越级动作。算法经过现场工况验证,响应速度快、判断准确率高,能够在短时间内输出清晰的故障结果,为执行模块提供可靠指令依据。

3.3 保护动作执行模块设计

保护动作执行模块接收判别结果,完成故障隔离与设备保护操作。模块接收跳闸或告警信号后,驱动出口

继电器动作,控制断路器分闸,切断故障电流。执行机构响应时间短,机械特性稳定,保证指令可靠输出。执行逻辑设置多重闭锁条件,防止误触发导致非故障区域停电。对于无需断电的异常状态,模块触发声光告警或上传故障信号,提醒运维人员及时处理。执行回路采用冗余设计,关键节点双路配置,提升动作可靠性。模块与一次设备接口匹配规范,接线简洁牢固,能够适应频繁动作与长期带电工况,确保故障发生时保护指令准确落地。

3.4 系统联动控制模块设计

系统联动控制模块实现继电保护与自动化系统的协同运行,提升整体处置效率。模块接收保护动作信号后,向监控系统上传故障信息,更新运行状态,自动记录事件时序与参数。联动逻辑支持与备用电源、PLC控制系统、智能仪表协同工作,故障发生后自动启动备用回路,调整运行参数,保持非故障区域供电稳定。联动指令执行遵循安全规则,不影响关键设备运行,不引发二次故障。模块支持远程复归与本地调试,故障排除后可按流程恢复系统正常运行。联动机制简化人工干预流程,提升自动化水平,使保护动作与系统控制形成闭环,保障电气系统在故障状态下快速恢复稳定运行。

4 电气自动化系统继电保护优化设计

4.1 继电保护整定方式优化设计

整定参数直接决定保护动作精度,优化围绕计算方法与动态适配展开。传统固定整定依赖人工核算,难以匹配负荷波动与运行方式变化^[4]。优化后采用分层整定与在线校核结合的方式,依据设备额定值、线路阻抗、上下级配合关系完成基础定值计算。系统实时采集运行负荷、网络拓扑变化数据,自动修正整定值区间,避免保护拒动或越级动作。整定流程嵌入误差校验机制,对互感器变比、测量偏差进行补偿,提升参数准确性。整定模块支持离线预配置与在线调整,兼顾调试效率与运行灵活性,让保护阈值始终处于合理区间,增强复杂工况下保护动作的稳定性。

4.2 保护动作时序优化设计

动作时序优化目标是缩短故障处理时长,保证隔离逻辑有序。系统梳理主保护、近后备、远后备的动作层级,明确各环节延时区间。主保护保持最快响应速度,直接切除故障点。后备保护按层级设置合理延时,等待

主保护动作完成,避免无差别跳闸。时序逻辑结合故障严重程度动态调整,短路等恶性故障优先快速处理,过载等异常状态分级延时告警。优化过程消除时序冲突与动作盲区,防止多级保护同时启动造成电网扰动。时序参数可在线修改与模拟验证,确保实际动作流程顺畅,最大限度减小故障对系统的冲击。

4.3 多设备协同保护机制优化设计

多设备协同优化提升系统整体防御能力,打破单装置独立运行限制。优化后建立区域保护逻辑,汇集站内变压器、线路、开关柜、电机等设备的运行信息,形成全局故障判断依据。某一设备出现故障时,周边关联装置快速共享数据,配合完成闭锁、联动跳闸或备自投操作。协同机制加入状态辨识功能,识别检修、空载、满载等不同工况,调整协同策略。装置之间采用可靠通信交互故障信号,降低单装置采样误差带来的影响^[5]。协同逻辑经过多级仿真验证,动作一致、配合紧密,提升全站保护可靠性,实现故障早发现、快隔离、稳恢复,推动自动化系统向更安全高效方向运行。

结束语

整套设计方案围绕继电保护核心功能落地,完成了从硬件布局、软件逻辑到协同机制的全链条优化,各层级保护单元既保持独立可靠的动作能力,又能通过数据交互实现全局联动。经过多轮极端工况的模拟验证,该体系可有效规避误动、拒动风险,大幅提升电气自动化系统的故障响应与处置效率,完全适配工业现场复杂电磁环境下的长期稳定运行需求,可为同类电气自动化系统的保护升级提供扎实的实践参考。

参考文献

- [1]张允.基于继电保护技术的电气自动化系统设计与研究[J].电气技术与经济,2025(8):98-100.
- [2]连江,班文哲,焦平,等.继电保护技术在现代电气自动化系统中的集成与优化[J].自动化应用,2025,66(24):123-125.
- [3]张满隆,曹健飞.电气自动化系统中继电保护的安全技术研究[J].电气技术与经济,2024(9):21-23.
- [4]刘贻斌.电力电气工程中自适应继电保护技术的优化设计[J].消费电子,2025(23):158-160.
- [5]温周项.基于自动化技术的变电站电气系统运行时钟同步方法[J].电气技术与经济,2025(10):106-108.