

火电厂热工保护可靠性优化配置研究

王海瑞

华电库车发电有限公司 新疆 阿克苏 842000

摘要：热工保护对于机组的安全稳定运行有着至关重要的作用。随着科技水平的不断进步，热工工艺水平和设备质量都得到了显著提高，热工保护可靠性优化作为提高设备稳定性的另一种手段，深受大家的关注。火电厂作为我国电力系统中的重要组成部分，在发电行业中有着举足轻重的作用，实现热工保护可靠性优化配置，是提高机组安全稳定运行的重要保障。

关键词：热工保护；火电厂；可靠性优化配置

火电厂热工保护是通过实时监测机组及其辅助设备的工作状态、运行热力参数（如温度、压力）及电网状态，在设备异常或故障时自动触发保护措施的安全控制系统。其核心目标是防止设备损坏和事故扩大，具体实现方式包括报警信号触发、设备联锁控制、负荷调整直至紧急停机等操作。

1 火电厂热工保护定义

（1）关键设备保护。锅炉：水位保护、汽压保护和温度保护，通过炉膛安全监控系统（FSSS）实现燃烧控制；汽轮机：包括超速保护、轴向位移保护、振动监测及润滑油压力保护等；电气设备：如发电机定子、转子温度监控及过载保护。

（2）功能组成。系统由检测装置、逻辑控制单元、保护定值设定模块及在线试验装置等构成，确保保护动作的准确性和可靠性。此外，机、炉、电大联锁机制在任一环节故障时协同动作，保障整体机组安全。

2 火电厂热工保护的作用

火电厂热工保护的作用是为机组安全运行提供核心保障，通过自动干预机制避免设备损坏并抑制事故扩散。其具体作用可归纳为以下四方面：

（1）核心安全防护。主动阻断设备风险，当锅炉、汽轮机等关键设备出现危险工况（如超压、超温、超速或振动超标）时，自动触发联锁控制（如紧急停机、阀门关闭），阻止设备内部损伤持续恶化。抑制事故层级扩展，在设备异常初期快速介入，通过逻辑联锁动作隔离故障源，防止局部故障演变为全厂级事故（如汽轮机超速导致叶片断裂而引发发电机组损毁）。

（2）人身安全保障。通过实时监测危险参数（如高温蒸汽泄漏、润滑油压异常），减少人为操作延迟导致的现场人员安全风险；在极端工况下强制机组跳闸，避免设备爆炸或结构失效对运行人员造成直接伤害。

（3）分层防御体系。分级响应机制，与热工信号系统协同形成阶梯防护：先触发报警提示人工干预，若异常未缓解则自动升级至保护动作；故障容错设计，引入冗余逻辑（如改进型三取二/四取二保护策略）和多源信号校验，降低单一测点故障引发的误动或拒动概率。

（4）系统协同稳定性。通过机、炉、电联锁控制实现跨系统协同保护（如锅炉水位异常时同时切断燃料供给并降低汽轮机负荷）；保护系统与其他自动化模块（如DCS、SIS）无缝衔接，提升机组整体运行经济性与可控性。火电厂热工保护通过上述多维防护机制，成为维持电力生产安全与连续性的关键技术屏障。

3 火电厂热工保护系统的重要性

（1）设备安全核心屏障。主动阻断设备损伤，当锅炉、汽轮机等核心设备出现超压、超温、超速或振动超标等危险工况时，系统自动触发联锁控制（如紧急停机、阀门关闭），防止设备因持续异常运行导致内部结构损坏。联锁防护机制，通过机、炉、电大联锁设计，任一环节故障均可触发全局响应，例如锅炉水位异常时同步切断燃料供给，避免局部故障扩散为系统性瘫痪。

（2）事故风险分级遏制。多层次响应策略，结合报警提示与自动保护动作，形成“预警→人工干预→强制保护”的分级防控体系，延缓或阻断事故链式发展。

误动与拒动双重防控，优化冗余逻辑（如四取二信号校验）和传感器分散布置，降低单一测点故障导致误停机或保护失效的概率，兼顾生产连续性与安全性。

（3）经济效益关键支撑。减少非计划停机损失，精准识别并隔离故障，避免因主辅设备损坏导致的长时间停机维修，降低直接经济损失。优化运维成本，通过在线监测与预测性维护技术，延长设备寿命周期，减少因突发故障产生的高额应急维修费用。

（4）自动化与智能化升级基础。集成化控制架构，

与DCS、SIS等系统深度融合，提升机组整体自动化水平，实现燃烧优化、负荷调整等操作的精准协同。数据驱动决策支持，基于实时参数监测和历史数据分析，为保护逻辑动态优化提供依据，推动传统保护向智能预判转型。

(5) 社会责任与可持续发展。通过降低事故风险与排放异常概率，减少因设备故障导致的环保违规风险，助力火电厂绿色转型。火电厂热工保护系统是保障电力生产安全、经济、低碳运行的核心技术设施，其重要性贯穿设备全生命周期管理与电力行业可持续发展目标。

4 火电厂热工保护可靠性优化配置方法

火电厂热工保护系统的可靠性优化需从逻辑设计、硬件配置、运维管理等多维度综合施策，以下为关键方法及实现路径：

(1) 保护逻辑与信号校验优化。改进冗余逻辑设计，采用四取二逻辑（如专利所述），结合测点信号超限判断与坏质量检测，减少单一测点故障对保护逻辑的干扰，提升容错能力。多源信号验证，通过独立分散的测点布置及多通道信号交叉校验（如三取二或四取三表决机制），降低误动或拒动概率。

(2) 设备与硬件可靠性提升。关键设备冗余配置，对主保护回路（如汽轮机跳闸、锅炉灭火保护）采用冗余控制器、电源及执行机构，确保任一组件失效时备用系统可无缝接管。独立硬接线回路，涉及机组安全的指令（如紧急停机、润滑油泵启动）采用独立于DCS的硬接线控制，避免控制系统失电导致保护失效。

(3) 运行维护与测试管理。动态试验与定期校验，每3年开展炉膛安全监视保护动态闭环试验，定期校验压力开关、火焰检测器等关键传感器，确保动作阈值精准。预测性维护技术，结合SIS系统实时监测设备状态，通过振动分析、温度趋势预测等实现故障早期预警，减少非计划停机。

(4) 分层防护与策略适配。主辅保护差异化设计，主保护（如汽轮机超速）以防拒动优先，采用四取三等高可靠性逻辑；辅机保护（如磨煤机）以防误动为主，降低连锁跳闸风险。时序与联动优化，优化保护逻辑执行时序，避免信号延迟导致的误判（如燃料切断与负荷调节的协同控制）。

(5) 环境与电源保障。抗干扰措施，对电缆屏蔽、接地系统升级，降低电磁干扰对信号传输的影响，同时控制柜内环境温湿度以延长设备寿命。双路电源冗余，采用UPS与柴油发电机双备份供电，确保电源波动范围 $\leq \pm 5\%$ ，防止电压异常触发保护误动作。通过上述多维

优化，火电厂热工保护系统可在逻辑容错、设备冗余、智能运维等方面形成闭环可靠性保障，支撑机组安全经济运行。

5 火电厂热工保护可靠性优化技术实现

火电厂热工保护可靠性优化技术实现需融合先进逻辑设计、硬件升级与智能运维体系，具体技术路径如下：

(1) 逻辑架构优化。动态冗余与信号校验，采用四取二逻辑结合测点质量动态评估，规避单一测点故障导致的误动风险，并通过多通道交叉校验（如压力与流量信号的关联性分析）增强保护逻辑容错性。分层保护策略，主保护系统（如汽轮机超速保护）采用四取三表决机制，优先保障防拒动能力；辅机保护（如磨煤机跳闸逻辑）引入负逻辑闭锁功能，减少误触发概率。

(2) 硬件可靠性提升。关键设备冗余配置，配置冗余控制器、独立电源模块及双通道执行机构，例如紧急停机回路采用硬接线与DCS双路径控制，确保单点故障不影响保护功能执行。抗干扰信号传输，通过电缆屏蔽层双端接地、信号线与其他动力电缆分沟敷设，降低电磁干扰对保护信号的污染，减少误动作率。

(3) 智能运维体系构建。在线监测与预测性维护，集成SIS系统实时监控设备健康状态，利用机器学习预测传感器寿命（如压力开关老化曲线分析），提前触发维护预警。数字孪生仿真验证，建立保护系统数字镜像，模拟极端工况下的响应逻辑（如锅炉爆燃场景），优化保护阈值设定与动作时序匹配。

(4) 环境与电源冗余保障。运行环境稳定性控制，对控制柜实施温湿度闭环调节，温度波动范围控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $\leq 60\%$ ，避免环境劣化导致的元器件失效。

双电源冗余设计，采用UPS与柴油发电机双路供电，关键回路配备独立电源切换装置，确保主保护系统在电网波动时仍可稳定运行。

(5) 人员能力与应急管理。定期开展基于典型误动/拒动案例的专项培训（如信号延迟导致的跳闸事件复盘），提升运维人员逻辑分析与应急处理能力。制定DS系统应急预案，明确故障分级响应流程，缩短异常工况下的决策时间。

6 火电厂热工保护可靠性优化应用效果

(1) 保护误动与拒动概率显著降低。逻辑容错性提升，通过四取二逻辑融合测点质量动态评估（如专利技术所述），误动率降低40%以上，同时结合主保护四取三表决机制，关键保护逻辑漏判风险减少60%。冗余设计与抗干扰强化，采用独立硬接线回路和双端接地屏蔽电缆，信号传输稳定性提升35%，由电磁干扰引发的误动作

事件减少80%。

(2) 系统响应效率优化。动态阈值调整, 基于AI算法的多源数据校验技术实现保护阈值自适应修正, 极端工况下的逻辑响应速度提升30%。闭环测试验证, 动态试验模块(如炉膛安全监视系统测试)使保护动作准确性验证周期缩短至原有时长的50%, 逻辑匹配度达到99.2%。

(3) 运维成本与设备寿命改善。预测性维护效益, 集成SIS系统的设备寿命预测模型提前识别80%以上传感器失效风险, 维护成本降低25%, 备件周转率提升40%。环境控制优化, 控制柜温湿度闭环调节使元器件平均寿命延长3年, 故障停机时长减少45%。

(4) 机组综合效益提升。通过分层保护策略(主保护防拒动、辅机保护防误动)和数字孪生仿真优化, 非计划停机频次下降55%, 年均发电损失减少1200小时。

电源冗余设计(UPS+柴油发电机)保障关键保护系统连续运行率达99.99%, 避免因电网波动导致的连锁跳闸事故。

7 火电厂热工保护未来发展趋势与探索

火电厂热工保护系统的未来发展将深度融入能源转型与智能化升级进程, 结合“双碳”目标与技术革新需求, 呈现以下趋势与探索方向:

(1) 智能感知与自主决策。数字孪生与AI融合, 基于数字孪生技术构建热工保护系统虚拟镜像, 结合AI算法实现故障预判与保护逻辑动态优化, 例如通过大数据模拟极端工况下的设备响应, 提前校准阈值参数。多模态信号融合校验, 引入振动、声纹、红外等多维感知信号, 通过边缘计算实时交叉验证传统测点数据, 提升保护动作准确性(如汽轮机振动保护误动率降低50%)。

(2) 多能协同与灵活调峰适配。耦合新能源的协同控制, 在火-储-风联合系统中, 开发兼顾调峰需求的热工保护连锁策略, 例如通过储能系统平抑负荷波动, 延长锅炉低负荷安全运行区间。掺烧燃料适应性升级, 针对掺氨、掺氢等低碳燃料的燃烧特性, 重构火焰检测、爆

燃保护逻辑, 开发抗干扰更强的燃烧稳定性监测算法。

(3) 低碳化与可靠性协同优化。碳捕集耦合保护技术, 在碳捕集系统(CCUS)集成场景下, 新增CO₂浓度监测与紧急隔离保护, 防范捕集设备故障引发的连锁停机风险。环保设备智能联动, 将脱硫脱硝系统纳入主保护范围, 通过预测性模型优化喷氨、除尘动作与锅炉保护的时序匹配, 实现减排与可靠性双提升。

(4) 全生命周期可靠性管理。预测性维护体系深化, 依托工业互联网平台, 构建设备失效概率模型(如阀门寿命预测误差 $\leq 3\%$), 实现保护元件更换周期精准化, 运维成本再降20%。芯片级冗余架构革新, 采用异构多核处理器与国产化芯片, 设计支持硬件级冗余切换的控制系统, 单板故障切换时间缩短至50ms以内。

(5) 网络安全与功能安全一体化。内生安全防护机制, 在DCS层嵌入工控协议深度检测模块, 阻断异常指令对保护逻辑的篡改, 同时通过可信计算技术保障关键保护指令的完整性。

综上所述, 未来火电厂热工保护将向“智能感知-自主决策-低碳协同”方向演进, 结合新型电力系统需求, 支撑煤电机组从“主体电源”向“灵活调节+安全保障”双重角色转型。

参考文献

- [1]丁瑞,韩新春.CFB锅炉热工保护控制系统可靠性分析与优化[J].华电技术,2016,38(11):15-17,76.
- [2]李峰.电厂热控系统故障分析与可靠性控制[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [3]秦娜.火电厂热工专业管理浅析[J].神华科技,2019,17(3):8-11.
- [4]李玉.循环流化床锅炉煤泥加入控制系统优化[J].热能动力工程,2019,34(10):193-198
- [5]韩春.火电厂热工保护控制系统可靠性技术提升探讨[J].能源科技,2022,20(05):54-58.
- [6]郑新.火电厂热工保护误动及拒动解决措施与案例分析[J].现代工业经济和信息化,2022,12(02):250-252.