

火电机组备用状态下设备维护效能提升研究

黄晓飞

华能国际电力江苏能源开发有限公司南京电厂 江苏 南京 210044

摘要: 火电机组备用状态是电网调峰保供的重要支撑,但当前备用设备维护存在效能偏低、痛点突出等问题,制约设备可靠性与经济性。本文结合冷、热、旋转备用状态特征,分析关键设备失效模式与维护痛点,构建科学的维护效能评估体系,提出基于状态监测、资源优化配置及数字孪生的关键技术,创新分级责任、协同联动等管理机制。研究实现维护模式从被动处置向主动防控转型,有效提升备用设备维护效能,为火电机组备用设备高效运维提供技术与制度支撑。

关键词: 火电机组; 备用状态; 设备维护; 效能提升; 关键技术

引言: 随着电网调峰需求日益增加,火电机组备用时长与频次显著提升,备用设备维护质量直接影响机组启动可靠性与电网供电稳定性。当前火电机组备用维护存在腐蚀老化、频繁启停损耗等痛点,传统维护模式与技术已无法适配新形势下的运维需求,维护效能偏低问题凸显。基于此,本文聚焦火电机组备用设备维护效能提升,系统分析设备特性与维护需求,构建评估体系、研发关键技术、创新管理机制,对破解运维瓶颈、提升火电机组备用保障能力具有重要现实意义与工程价值。

1 火电机组备用设备特性与维护需求分析

1.1 火电机组备用状态分类与运行特征

火电机组备用状态按停运时长、设备状态及响应速度,分为冷备用、热备用、旋转备用三类,技术差异显著。(1)冷备用指设备完全停运、泄压降温至环境状态,无随时启动条件,多用于长期调度停运,设备呈“休眠”态且无介质流动;(2)热备用指设备维持额定温压,辅助系统正常运行,可短时间启动并网,多用于调峰,需保障核心部件热态稳定;(3)旋转备用指机组空转未并网、转速达额定值,可瞬时响应负荷,处于动态待命且能耗较高。三类状态的运行差异,决定了维护策略的针对性。

1.2 关键备用设备及其失效模式

火电机组备用期间,锅炉、汽轮机、发电机等核心设备易出现特定失效模式。锅炉易因水汽残留发生水冷壁腐蚀、省煤器堵塞,长期停运还会出现炉管氧化皮脱落;汽轮机转子、汽缸易因温度不均产生热应力,密封件老化变形,导致启动时漏气、振动超标;发电机转子绕组易受潮绝缘下降,定子铁芯可能锈蚀,长期闲置会造成轴承润滑失效。

1.3 备用状态下的维护痛点

备用状态维护存在两大核心痛点,制约效能提升。(1)长期停运易引发设备腐蚀、绝缘老化,冷备用设备无介质保护,水分、杂质易侵入,造成金属腐蚀、电气绝缘下降,增加启动故障风险;(2)频繁启停损耗设备寿命,热备用、旋转备用需随电网负荷频繁启停,部件反复承受冷热冲击易疲劳损伤,瞬时负荷冲击加剧易损部件损耗,且现有维护模式无法适配频繁启停需求^[1]。

2 火电机组备用设备维护效能评估体系构建

为科学衡量火电机组备用设备维护质量、精准定位短板,需构建科学可操作的维护效能评估体系。(1)备用设备维护效能的核心内涵,涵盖维护质量、效率、经济性、安全性四大维度。结合冷、热、旋转备用的运行差异,筛选备用设备可用率、维护缺陷检出率等核心可量化指标,明确各指标标准,为效能量化提供支撑。(2)基于多源数据的效能评估模型,以备用设备全生命周期数据为支撑,整合设备运行、维护管理、环境影响三类关键数据。经数据标准化、异常值剔除、缺失值补齐等预处理,消除冗余偏差,构建多维度数据融合模块,以核心指标为输出向量,搭建四层评估模型,实现不同备用状态下维护效能的动态精准评估。(3)评估方法采用层次分析法(AHP)与模糊综合评价法结合,兼顾科学性与实用性:通过AHP法拆解层级、构建判断矩阵并检验一致性,确定指标权重;引入模糊隶属度函数,解决部分指标难以精准量化的问题,实现定性与定量融合。采用某300MW火电机组实际运维数据验证,将模型计算得分与设备实际运行、成本管控效果比对,验证模型准确性与实用性,保障评估体系可落地应用^[2]。

3 火电机组备用设备维护效能提升关键技术

3.1 基于状态监测的预测性维护策略

3.1.1 关键参数在线监测技术

关键参数在线监测技术核心是通过优化传感器布局,实现备用设备关键运行参数的实时精准采集,规避监测盲区与数据冗余。结合火电机组备用设备特性,重点针对振动、温度、压力、绝缘性能四大类核心参数,依据冷、热、旋转备用状态差异,制定差异化布局方案。振动监测针对汽轮机转子、发电机轴承等旋转部件,采用压电式振动传感器,遵循“关键部位全覆盖、次要部位按需布置”原则,在易振动异常位置布设,采样频率设定为100Hz-1kHz。温度监测覆盖设备本体、电气接头等部位,采用热电偶与红外测温传感器组合,本体用K型热电偶,不易接触部位用红外非接触式传感器,测温误差控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内。压力监测针对锅炉汽包等承压部件,采用扩散硅压力传感器在关键点位布设;绝缘性能监测针对发电机绕组等电气设备,采用绝缘电阻传感器与介损测试仪组合,结合备用时长动态调整采集频次。

3.1.2 故障预测与健康管理(PHM)模型

故障预测与健康管理(PHM)模型以机器学习算法为核心,挖掘监测数据与设备健康状态的关联,实现故障提前预测与健康动态评估,剩余寿命预测(RUL)是核心功能。模型构建遵循“数据预处理-特征提取-模型训练-模型优化”流程,先对多维度监测数据预处理,用滑动窗口法剔除异常值、线性插值法补齐缺失数据,通过Z-score标准化统一量纲。特征提取针对不同数据采用差异化方法,振动数据提取时域与频域特征,温度、压力数据提取趋势特征,绝缘数据提取衰减特征,经主成分分析法(PCA)降维保留核心特征。模型训练采用LSTM神经网络与随机森林算法组合,LSTM处理时序关联关系实现RUL初步预测,随机森林分类故障类型优化精度。以历史监测数据、故障记录为样本划分训练与测试集,迭代调整超参数优化损失函数,控制预测误差。

3.1.3 动态维护阈值设定与预警机制

动态维护阈值设定与预警机制核心是打破固定阈值局限,结合设备实时状态、备用时长、环境条件,动态调整阈值与预警等级,实现维护精准触发。阈值采用“基准阈值+动态修正”方式,结合出厂标准、行业规范及历史数据确定基准阈值,明确正常、轻微异常、严重异常区间。构建动态修正模型,引入备用时长、环境湿度等修正因子,冷备用时适当降低阈值提高灵敏度,热备用、旋转备用时适当提高阈值避免误触发。预警机制按异常程度分三级:轻微异常触发一级预警提示重点监测;中度异常触发二级预警启动针对性巡检;严重异常触发三级预警,暂停备用并启动应急维护。预警信号联动监测与维护管理平台,实现信息实时推送、数据可追溯。

3.2 备用设备维护资源优化配置

3.2.1 维护人员技能矩阵与任务分配

维护人员技能矩阵与任务分配核心是构建适配维护需求的专业化团队,实现技能与任务精准匹配。建立技能矩阵,从专业知识、操作技能、应急处置、设备熟练度四个维度分级分类人员,明确核心层级人员需掌握核心设备维护、故障诊断及PHM模型应用,基础层级人员掌握常规巡检与简单维护。结合技能矩阵开展针对性培训,聚焦备用设备维护重点与应急流程,定期考核并将结果与技能等级挂钩。任务分配基于设备重要性分级,将设备分为核心关键、重要辅助、一般辅助三类,核心设备由高技能人员专人负责,重要辅助设备由中技能人员搭配基础人员协同,一般设备由基础人员负责。

3.2.2 备件库存动态管理模型

备件库存动态管理模型核心是结合设备劣化规律,实现备件需求精准预测与库存合理管控,平衡供应与成本。模型整合设备运行、维护记录、备件消耗数据,构建需求预测模型,通过分析劣化速率、维护频次、备件寿命,预测不同备用状态下的备件需求。采用ABC分类法分级备件,A类核心关键备件足额供应,采用定点订货模式;B类重要备件保持合理安全库存,采用定期订货模式;C类一般备件按需订货减少积压。建立库存动态调整机制,实时更新库存、消耗及预测数据,根据备用状态变化与劣化趋势调整定额,冷备用时提高核心备件库存、压缩一般备件,热备用、旋转备用时优化库存结构。建立备件共享机制,整合区域内机组备件资源,实现互通调配。

3.2.3 维护窗口期优化与启停策略协同

维护窗口期优化与启停策略协同核心是合理规划维护时间,减少非计划停运对电网调峰的影响,实现与电网调度适配。窗口期优化以电网负荷调度为核心,结合设备备用状态、维护优先级及健康状态,构建优化模型计算最优维护时段,优先选择负荷低谷、避开调峰高峰,核心设备窗口期优先保障。建立维护与启停协同机制,提前与电网调度沟通,根据维护时长与复杂度制定合理启停方案,避免频繁启停损耗与调度冲突。冷备用转热备用、热备用转并网前开展维护预处理,优化流程缩短时间;需暂停备用维护时,制定备用替代方案减少影响,同时建立窗口期动态调整机制,根据负荷变化与维护进度实时优化计划。

3.3 基于数字孪生的维护决策支持系统

3.3.1 数字孪生技术架构设计

数字孪生技术架构核心是构建物理设备与虚拟模型

的实时映射与交互,为维护决策提供支撑,分为物理层、数据层、模型层、应用层四层。物理层整合备用设备、传感器等实体,实现状态与参数全面感知,通过工业互联网传输实时数据至数据层。数据层负责数据接收、存储、预处理与融合,整合多源数据,采用分布式存储保障安全,经清洗、标准化形成高质量数据。模型层构建与物理设备1:1的虚拟孪生模型,涵盖几何、物理、行为模型,通过实时数据实现虚实同步,支持可视化监控设备状态与健康趋势。

3.3.2 维护方案仿真与优化

维护方案仿真与优化核心是通过虚拟场景测试维护策略效果,筛选最优方案,降低风险与成本。基于数字孪生虚拟模型,构建仿真场景,还原不同备用状态下的设备环境与健康状态,模拟维护策略实施过程。针对同一需求设计多种方案,通过仿真分析维护效率、成本、健康恢复效果等指标,筛选最优方案。仿真中可模拟异常场景,测试应急处置能力,优化流程薄弱环节与资源配置。建立仿真结果反馈机制,将优化方案应用于实际维护,收集效果数据反哺模型优化,提升仿真精度与方案适用性,实现维护方案持续优化。

3.3.3 人机协同决策平台开发

人机协同决策平台核心是集成专家经验与数据驱动智能推荐功能,实现维护决策智能化。平台整合数字孪生、PHM模型及维护资源数据,构建统一决策界面。数据驱动模块基于多源数据与PHM模型输出,自动生成维护建议并明确优先级;专家经验模块整合行业专家与资深人员经验,建立知识库,支持手动输入决策建议。平台实现数据推荐与专家经验融合,维护人员结合两者制定最终决策,支持决策过程全程记录追溯。具备数据可视化功能,以图表呈现设备健康、维护进度等信息,提升决策效率,同时支持多终端接入,保障维护决策及时精准^[3]。

4 火电机组备用设备维护管理机制创新

为破解备用设备维护效能瓶颈,构建全方位、动态化的维护管理机制,实现管理模式从“被动处置”向“主动防控”转型。创新机制涵盖以下三大核心模块。(1)建立分级责任管控机制,明确各层级维护责任,将备用设备按重要性分级,落实专人负责制,细化核心设备、辅助设备的维护职责与流程,杜绝责任盲区。(2)构建多部门协同联动机制,整合运维、调度、技术等部门资源,建立定期沟通会商制度,实现维护计划与电网调度、设备状态的精准协同,提升维护响应效率。(3)创新考核激励机制,摒弃传统单一考核模式,将维护效能评价指标与考核挂钩,重点考核设备可用率、缺陷检出率等核心指标,设立创新奖励条款,鼓励维护人员优化流程、应用新技术。同时建立机制动态优化体系,定期收集维护数据与反馈意见,结合设备劣化规律、技术升级情况,持续完善管理机制,确保其适配不同备用状态下的维护需求,为维护效能提升提供制度保障^[4]。

结束语:本文围绕火电机组备用设备维护效能提升展开全面研究,完成了备用设备特性与维护需求分析,构建了可落地的效能评估体系,提出了针对性的关键技术与创新管理机制,有效解决了当前备用维护中的核心痛点。后续可结合实际运维场景,进一步优化评估模型与关键技术精度,完善管理机制细节。

参考文献:

- [1]王坤.集控运行对火电厂机组稳定性与效能的影响[J].大众标准化,2025(15):46-48.
- [2]王首臣.火电机组电除尘设备节能提效控制系统设计与实现[J].电子元器件与信息技术,2025,9(3):41-43+47.
- [3]杨新伟.火电厂设备管理中点检定修制的效能评估[J].电力设备管理,2025(12):117-119.
- [4]郭学昌.火电厂集控运行机组深度调峰能力提升路径分析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(12):116-119.