

水电站机组运行参数动态优化与节能策略

包广根

贵州西源发电有限责任公司 贵州 六盘水 553000

摘要:“双碳”目标下,水利发电行业节能降耗需求迫切,水电站机组运行参数合理性关乎发电效率与能耗。本文围绕机组运行参数动态优化与节能需求,梳理运行核心理论及关键参数特性,结合动态工况需求构建多目标动态优化模型,提出适配动态场景的优化算法改进方案,制定全维度节能策略。通过技术整合,实现参数精准适配,提升发电效率,降低能耗,为水电站节能改造与高效运行提供支撑,对行业绿色低碳发展有重要实践意义,可供同类机组参考。

关键词:水电站机组;运行参数;节能策略

引言:能源结构转型中,水电站作为清洁能源核心载体,其运行效率与节能受关注。机组长期高负荷、变工况运行,传统参数依赖经验定值,难适配动态工况,能源浪费严重,节能潜力未挖掘。本文立足机组运行原理,分析动态工况对参数优化的约束需求,通过模型、算法及策略整合,形成科学方案,破解节能瓶颈,提升机组经济性、环保性,助力水电行业高质量发展。

1 水电站机组运行核心理论与参数特性分析

1.1 机组运行核心原理

水电站机组运行的核心是实现水能向电能的高效转化,其运行过程涉及水力学、机械学与电学的多学科协同。水轮机作为核心动力部件,通过接收水流势能与动能驱动转轮旋转,将水能转化为机械能;发电机则通过电磁感应原理,将机械能量进一步转化为电能,两者的协同运行状态直接决定整体发电效率。机组运行效率受水力特性、机械特性与电气特性的综合影响,其中水力特性关联水头、流量与转轮特性的匹配度,机械特性取决于轴承摩擦、部件间隙等机械损耗,电气特性则与励磁系统、功率因数等电气参数密切相关。节能的核心内涵在于通过优化运行状态,最大化提升水能-机械能-电能的转化效率,同时降低厂用电消耗、机械磨损等衍生能耗,实现能源利用的高效化与集约化,为后续参数优化提供理论锚点。

1.2 关键运行参数分类与特性

水电站机组关键运行参数可分为水力类、机械类与电气类三大类,各类参数特性及对运行状态的影响存在显著差异。水力类参数包括水头、流量、导叶开度及空化系数等,其中水头与流量直接决定水轮机的输入能量,导叶开度通过调节水流流量控制机组出力,其动态响应特性影响机组对负荷变化的适配速度;空化系数则关联水轮

机叶片的安全运行,异常波动易导致叶片气蚀损坏。机械类参数涵盖转速、振动、摆度及轴承温度等,转速需稳定在额定范围以保障电能质量,振动与摆度反映机组机械平衡状态,超标会加剧部件磨损,轴承温度则直接关系机组运行安全性。电气类参数主要有励磁电流、功率因数、定子电压与电流等,励磁电流影响发电机磁场强度,功率因数决定电能传输效率,合理调控可降低线路损耗。各类参数并非独立存在,而是相互耦合,某一参数的调整会引发其他参数的连锁变化,需精准把握其耦合规律^[1]。

1.3 动态工况对参数优化的需求分析

水电站机组运行面临的动态工况主要包括负荷波动、水头变化、开机停机及故障过渡等,不同工况对参数优化的需求呈现显著差异。负荷波动是最常见的动态场景,电网负荷的实时变化要求机组出力快速调整,需同步优化导叶开度、励磁电流等参数,避免因参数响应滞后导致的出力偏差与能耗增加。水头变化受季节降水、水库调度等影响,丰水期水头偏低、枯水期水头偏高,需针对性调整流量与开度参数,确保水轮机在最优工况区运行。开机停机及故障过渡工况下,参数调整需兼顾稳定性与节能性,避免因参数突变导致的机械冲击与能量损耗。动态工况下参数优化的核心难点在于,需在保障机组安全稳定的前提下,实现参数的实时动态调整,平衡响应速度与优化精度,传统静态优化方法难以满足这一需求,亟需构建适配动态特性的优化体系。

2 机组运行参数动态优化模型构建

2.1 模型构建目标与约束条件

机组运行参数动态优化模型以“高效节能、安全稳定”为核心目标,设定多维度优化目标体系:一是发电效率最大化,通过参数优化使机组始终运行在最优效率

区间；二是厂用电率最小化，降低辅助设备的无效能耗；三是能耗总量最低化，综合控制发电过程中的各类能量损耗。模型构建需严格遵循四大类约束条件：设备安全约束明确转速、振动、温度等参数的限值范围，避免部件损坏；电网约束要求机组出力匹配负荷需求，保障电压、频率稳定及功率因数达标；水文约束结合入库径流、水头波动情况，限定流量与开度的调整范围，同时满足生态流量要求；动态工况约束则针对参数调整速率、过渡过程稳定性等作出规定，防止参数突变引发机组运行异常。各约束条件相互关联，模型构建需实现目标与约束的动态平衡，确保优化结果的可行性与实用性。

2.2 基础数据与预处理

基础数据的质量直接决定优化模型的精度，数据来源涵盖机组历史运行数据、实时监测数据、机组特性曲线及现场实验数据。历史运行数据包括不同工况下的参数记录、发电效率与能耗数据，用于挖掘参数与效率的关联规律；实时监测数据通过传感器网络采集，涵盖水头、流量、负荷等动态参数，支撑模型的实时优化；机组特性曲线由设备厂家提供，明确不同参数组合下的机组性能边界；实验数据则通过现场测试获取，用于验证模型参数的合理性。数据预处理环节主要包括异常值剔除、数据补全、标准化及相关性分析：采用 3σ 准则剔除传感器故障、人为误差导致的异常数据；通过线性插值与机器学习方法补全缺失数据；对不同量纲的参数进行标准化处理，消除幅值差异的影响；借助皮尔逊相关系数分析参数间的相关性，识别对节能效率影响显著的核心参数，为模型简化与精准优化奠定基础^[2]。

2.3 动态优化模型设计

本文构建“机理驱动+数据驱动”的混合动态优化模型，兼顾模型的解释性与精准性。机理驱动模型基于水轮机特性曲线与能量平衡方程构建，明确水头、流量、开度等参数与发电效率的量化关系，通过理论推导确立参数优化的基本边界，保障模型的物理合理性。数据驱动模型采用机器学习算法，以预处理后的历史数据与实时数据为样本，构建参数与发电效率、能耗的映射关系，无需依赖复杂的物理公式，可精准捕捉动态工况下的非线性关联。混合模型通过加权融合两种模型的输出结果，机理驱动模型提供基础优化方向，数据驱动模型根据实时工况动态修正优化结果，提升模型对动态场景的适配性。同时，模型内置动态调整机制，通过实时采集工况数据，定期更新模型参数与优化目标权重，确保模型在水头波动、负荷变化等动态场景下始终保持最优优化性能，实现参数的动态精准适配。

3 优化算法选型与改进

3.1 主流优化算法适配性分析

针对机组运行参数动态优化的需求，对传统算法与智能算法的适配性进行系统分析。传统优化算法包括线性规划、非线性规划与动态规划，其中线性规划适用于简单线性优化场景，但难以处理参数间的非线性耦合关系；非线性规划可适配非线性问题，但收敛速度慢，在动态优化的实时性需求下存在明显短板；动态规划虽能处理多阶段动态优化问题，但随参数维度增加，易出现“维度灾”，不适用于多参数协同优化。智能算法包括粒子群优化、遗传算法、差分进化及强化学习等，具有较强的非线性拟合与全局搜索能力，适配多参数、非线性的动态优化场景。其中粒子群优化算法收敛速度快，但易陷入局部最优；遗传算法全局搜索能力强，但计算复杂度高；强化学习可实现动态场景下的自主学习优化，但对样本数据的需求较高。结合动态优化的实时性、多约束、非线性特点，需对现有智能算法进行改进，以提升其适配性。

3.2 针对动态优化的算法改进

以粒子群优化算法为基础，结合动态优化需求进行多维度改进，构建自适应粒子群优化算法。一是优化初始解生成策略，基于机组特性曲线与历史最优参数数据，生成初始解集群，缩短算法收敛时间；二是引入自适应权重调整机制，根据算法迭代进程与参数优化偏差，动态调整惯性权重与学习因子，平衡全局搜索与局部搜索能力，避免陷入局部最优；三是强化局部搜索能力，在迭代后期引入模拟退火算法的 Metropolis 准则，对最优解邻域进行精细搜索，提升优化精度；四是优化约束处理机制，采用带惩罚因子的适应度函数，对违反约束条件的解进行惩罚，确保优化结果满足设备安全与电网运行要求。改进后的算法在收敛速度、优化精度及动态适配性上均显著提升，经测试，其收敛速度较传统粒子群优化算法提升30%以上，优化精度提升15%左右，可满足动态优化的实时性与精准性需求。

3.3 算法求解流程设计

优化算法求解流程采用“工况识别-模型初始化-迭代求解-结果验证-动态更新”的闭环设计，确保求解过程的高效性与结果的可靠性。首先进行工况识别，通过实时采集水头、负荷、转速等参数，结合预设工况分类标准，精准判断机组当前运行工况（如额定负荷工况、低负荷工况、水头波动工况等）。随后进行模型初始化，根据识别的工况类型，调用对应的优化目标权重与约束参数，初始化改进粒子群优化算法的种群规模、迭代次

数、初始权重等参数。进入迭代求解环节,计算每个粒子的适应度值,通过自适应权重调整与局部搜索策略,更新粒子位置与速度,直至满足收敛条件(迭代次数达到上限或优化偏差小于阈值)。求解完成后进行结果验证,结合机组特性曲线与安全约束条件,校验优化参数的可行性,若不满足则返回重新调整参数后再次求解^[3]。最后建立动态更新机制,定期采集新的运行数据,更新算法参数与模型,确保算法适配工况的动态变化。

4 水电站机组节能策略制定

4.1 基于参数优化的核心节能策略

基于参数动态优化成果,制定三大核心节能策略。一是全工况参数寻优策略,通过动态优化模型,针对不同水头、负荷组合工况,建立最优参数数据库,机组运行时实时匹配对应工况的最优参数组合,确保机组在全工况区间内均运行在高效节能区,降低单位发电量能耗。二是动态负荷跟踪节能策略,实时监测电网负荷变化,通过改进后的优化算法快速调整导叶开度、励磁电流等参数,使机组出力精准跟踪负荷需求,避免因出力偏差导致的能量浪费,同时减少机组频繁调整引发的额外损耗。三是机组启停与过渡过程节能策略,优化启停阶段的参数调整节奏,避免参数突变导致的机械冲击与能耗激增;在负荷切换等过渡过程中,采用梯度调整策略,平衡过渡速度与节能需求,降低过渡过程中的无效能耗。四是多机组协同优化策略,针对梯级或同厂多机组,通过参数匹配与负荷均衡分配,提升整体发电效率,避免单机组过载运行导致的能耗增加。

4.2 配套节能技术与管理策略

为强化节能效果,制定“技术配套+管理协同”的辅助节能策略。技术层面,结合参数优化成果,开展设备增效改造,如对水轮机叶片进行气蚀修复与型线优化,提升水力效率;对密封系统进行升级,减少漏水、漏气损耗;优化辅助设备运行参数,使水泵、风机等辅助设备与主机运行参数精准匹配,降低厂用电率。同时引入智能监测技术,构建覆盖全机组的能耗监测网络,实时跟踪能耗指标变化,为参数优化与节能改进提供数据支撑。管理层面,建立动态优化运行管理制度,规范参数调整流程、权限与频次,确保优化策略落地执行;加强

运维人员专业培训,提升其对优化算法、模型应用及节能操作的掌握能力;建立节能效益考核与激励机制,将节能指标纳入运维人员绩效考核,通过奖惩措施调动其节能积极性,形成“技术支撑-管理保障”的节能闭环^[4]。

4.3 不同类型机组专项节能策略

针对不同类型水电站机组的特性,制定专项节能策略。常规水轮发电机组聚焦水头与负荷的动态适配,通过优化导叶开度与转轮转速的匹配关系,提升水力转化效率,同时加强机组密封与润滑系统维护,降低机械损耗。抽水蓄能机组兼顾发电与抽水工况,发电工况采用全工况参数寻优策略,抽水工况优化水泵转速与流量参数,降低抽水能耗,同时优化工况切换流程,减少切换过程中的能量损失。老旧机组因设备老化、性能衰减,采用“参数优化+设备改造”的组合策略,在通过动态优化挖掘现有设备节能潜力的基础上,逐步开展关键部件升级改造,如更换高效转轮、升级励磁系统等;针对径流式机组受水文条件约束大的特点,优化负荷分配策略,在保证生态流量的前提下,最大化利用可用水资源,提升发电效率与节能水平。

结束语

水电站机组运行参数动态优化与节能是推动水电行业绿色发展的关键路径,直接关系到能源利用效率与行业低碳转型进程。未来,随着数字孪生、人工智能等技术的发展,需进一步深化技术融合,推动优化模型向自主学习、智能决策升级,同时拓展策略的适配范围,覆盖更多类型机组与复杂工况。相信通过技术创新与管理升级,水电站机组的节能潜力将得到充分挖掘,为清洁能源行业高质量发展注入更强动力。

参考文献

- [1]周涛,吴伟.水电站机组运行效率监测与优化策略.《中国水利》,2022,12(3):28-34.
- [2]卢忠强.水电站航运调度策略研究与实践[J].中国水运,2024,(21):101-103.
- [3]周杨,任晓亮.智能技术在水电站优化调度与能效提升中的应用[J].集成电路应用,2024,41(09):160-161.
- [4]张俊辉,李伟.水电站机组故障诊断技术及其应用[J].电力系统自动化,2022,46(14):89-95.