

关于水电厂自动发电控制技术分析

唐 芳

祁阳市内下电站管理局 湖南 永州 426100

摘 要：水电厂自动发电控制技术通过整合实时气象、水文及电网负荷数据，依托智能化决策与分散式控制实现机组出力精准调节。其核心在于数据采集处理、控制策略算法、通信交互及安全容错等关键技术的协同，通过光纤传感、边缘计算、模型预测控制等手段，提升响应速度与效率。当前正朝着智能化、一体化协同、绿色环保融合及信息安全强化方向发展，在新型电力系统中，通过与新能源协同调节，强化水电枢纽作用，平衡发电效益与生态保护。

关键词：水电厂；自动发电控制；技术

引言

随着新型电力系统对灵活性调节需求的提升，水电厂自动发电控制技术成为衔接调度与机组运行的核心。传统人工调节模式已难以适配复杂工况，亟需转向多参数耦合的智能化决策。本文围绕该技术，先概述其核心逻辑与系统协同要求，再深入分析数据采集处理、控制策略等关键技术，最后探讨智能化、一体化等发展趋势，为理解其在电力系统转型中的作用提供全面视角。

1 水电厂自动发电控制概述

水电厂自动发电控制作为衔接电力系统调度与厂内机组运行的核心环节，通过整合实时气象信息、流域来水趋势及电网负荷需求，构建动态调节模型以实现机组出力的精准匹配。其核心逻辑在于将传统依赖经验的人工调节模式转化为基于多参数耦合分析的智能化决策过程，借助分散式控制系统对水轮机导叶开度、发电机励磁系统进行毫秒级响应，在满足电网频率稳定要求的同时最大化水能利用效率。系统运行过程中，需持续适配流域水文特性的季节性变化，通过内置自适应算法修正调节参数，例如在丰水期侧重提升机组负荷响应速度以消纳多余来水，枯水期则优化导叶调节曲线以减少水力损失。这种动态适配能力不仅降低了机组频繁启停造成的机械损耗，更通过平滑出力波动减少了对下游河道生态流量的冲击，形成发电效益与水资源生态保护的协同平衡。自动发电控制的效能发挥依赖于厂内多系统的深度协同，从水库水位监测终端到机组状态传感器，各类实时数据经边缘计算节点预处理后汇入中央控制平台，经智能决策模块解析后生成最优控制指令。此过程中，需重点解决不同机组特性差异带来的协调难题，通过建立机组性能衰减模型，在负荷分配时自动规避存在潜在故障风险的设备，同时利用预测控制算法提前规避电网负荷突变可能引发的水力冲击，确保整个发电系统在复

杂工况下保持稳定高效的运行状态。随着电力系统对新能源消纳要求的提升，自动发电控制正逐步向更开放的架构演进，通过预留与区域能源互联网的接口，实现与风电、光伏等间歇性电源的协同调节，在更大范围的电力平衡中承担起灵活调节的角色，这种扩展能力使得水电厂在新型电力系统中的枢纽作用得到进一步强化。

2 水电厂自动发电控制关键技术分析

2.1 数据采集与处理技术

数据采集与处理技术是自动发电控制的基础支撑，通过部署在水轮机蜗壳、尾水管、发电机定子绕组等关键部位的光纤光栅传感器与压电式振动探头，捕捉水流脉动压力、机组轴系摆度、电磁转矩等微观物理量的瞬时变化，这些分布式感知终端采用抗电磁干扰的差分信号传输方式，在强电磁环境下仍能保持测量精度的稳定性。原始数据先由边缘计算单元开展时域-频域转换，接着运用小波阈值去噪算法去除水流紊动引发的高频噪声，并且利用卡尔曼滤波针对传感器漂移误差实施动态补偿，让处理后的信号信噪比得到显著提升。针对水库水位、入库流量等缓变参数，采用自适应采样频率调节机制，在水位急剧变化时段自动提升数据刷新频次，而在稳定工况下降低采样密度以减少冗余传输，这种动态调整模式既保证了关键信息的时效性，又降低了系统通信带宽的占用压力。数据融合过程中引入联邦学习框架，让不同区域的传感器数据先在本地完成特征提取，随后开展全局模型训练。这种方式有效避免了原始数据跨区域传输产生的延迟和安全风险^[1]。融合后的特征向量经时序预测模型预处理，能提前生成具有趋势性的状态参数序列，为后续控制决策提供前瞻性的数据支持。

2.2 控制策略与算法

控制策略与算法的创新体现在对水力-机械-电气多物理场耦合特性的精准建模，通过构建水轮机过流部件的

三维流场仿真模型,将导叶开度变化引发的水力损失转化为可量化的控制约束条件,使负荷调节指令能够适配水流惯性带来的迟滞效应。模型预测控制算法在滚动优化过程中,不仅纳入机组当前的有功出力偏差,还将导叶调节速率、转轮叶片应力累积值作为优化目标函数的约束项,通过求解多目标非线性规划问题,生成兼顾响应速度与设备寿命的最优控制序列。针对不同季节的水文特性差异,算法内置的模式识别模块可自动识别流域来水的脉冲式或平稳式特征,在丰水期采用基于混沌优化的PID参数整定方法,加快负荷跟踪速度以避免弃水,枯水期则切换为模糊自适应控制策略,通过柔化导叶调节动作减少空化侵蚀。引入深度强化学习来构建机组负荷分配模型,把各机组的效率曲线、振动阈值、温升速率等多维参数作为状态空间。该模型通过与环境的不断交互,自主学习出最优的负荷分配策略,在确保总出力满足需求的前提下,显著提升机组群的综合效率。

2.3 通信与信息交互技术

通信与信息交互技术采用基于时间敏感网络的确定性传输架构,在交换机内部部署时间感知调度器,以此将机组控制指令的传输延迟控制在极低水平,其低时延特性可确保负荷指令从中央控制平台畅通无阻地传递至执行机构。信息交互采用面向服务的分布式架构,将水位监测、机组状态、电网指令等功能封装为标准化服务模块,各模块通过统一的数据交互协议实现松耦合通信,当系统进行功能扩展时,新增模块无需修改现有架构即可接入,极大提升了系统的可扩展性。为适应复杂电磁环境下的稳定通信,采用跳频扩频技术与极化码纠错编码相结合的手段,即便在信噪比较低的情况下也能维持数据传输的完整性,同时借助动态频谱感知避开工业干扰频段,保障控制指令在强电磁干扰环境中可靠送达。信息交互过程中引入数字孪生镜像技术,将物理设备的运行状态实时映射至虚拟空间,控制指令在下达前先在数字孪生环境中完成仿真验证,通过模拟不同工况下的执行效果提前修正可能存在的偏差,使实际控制动作的准确率得到显著提升。

2.4 安全与容错技术

安全与容错技术通过构建多层次防护体系保障系统在异常工况下的稳定运行,在感知层采用传感器冗余配置方案,关键测点部署的异构传感器组通过交叉校验识别故障元件,当某一传感器出现数据跳变时,系统自动切换至备用通道并启动自诊断程序定位故障点。控制层引入故障树分析模型,通过实时监测导叶伺服电机电流、励磁系统电压等特征参数,提前识别可能导致调节

失效的潜在隐患,在故障征兆出现时自动触发预保护机制,通过渐进式降低负荷输出避免系统进入危险状态。针对通信中断等极端情况,边缘计算节点内置自主控制逻辑,可在脱离中央控制平台的情况下维持机组基本运行参数的稳定,待通信恢复后再通过增量数据同步机制实现状态对齐,确保控制过程的连续性不受通信故障影响^[2]。系统还具备动态重构能力,当某一控制模块发生硬件失效时,相邻节点可自动接管其控制职能,通过负载均衡算法重新分配计算资源,在不中断发电过程的前提下完成故障模块的隔离与恢复,这种自愈能力显著提升了整个自动发电控制系统的运行可靠性。

3 水电厂自动发电控制技术的发展趋势

3.1 智能化水平不断提升

(1) 智能决策系统正从基于规则的静态控制向认知型动态决策演进,通过引入数字孪生与强化学习的深度融合框架,构建覆盖水库-机组-电网的全要素虚拟映射体,该映射体可模拟不同来水过程与负荷波动组合下的系统动态响应,使控制指令生成过程具备类人类专家的预判能力,能在流域水文特征出现细微异变时提前调整调节策略,避免传统模型在突变工况下的滞后性偏差。

(2) 机组状态感知向多物理场耦合诊断方向拓展,通过整合声发射信号、油液颗粒度分析与红外热成像数据,构建机组健康度数字画像,画像中嵌入设备老化的非线性演化模型,可精准识别导叶磨损、轴承间隙变化等渐进式故障的早期特征,使负荷分配方案在满足发电需求的同时自动规避潜在风险点,实现控制过程与设备健康管理的深度协同。(3) 自适应控制算法正突破单一工况适配局限,通过引入迁移学习机制,将历史运行数据中提炼的控制经验迁移至新工况场景,在流域来水模式发生季节性转型或机组经过大修改造后,无需人工重新整定参数即可快速形成适配新状态的调节逻辑,这种自进化能力使系统在复杂多变的运行环境中保持持续优化的控制效能。

3.2 一体化协同控制加强

(1) 厂内各子系统的协同维度从传统的控制指令传递向数据基因级融合深化,水库调度模块与机组控制单元共享水文-机械特征关联图谱,使水位调节策略能直接指导导叶开度的精细化修正,而机组振动特性反馈又可反向优化水库泄流方案,形成闭环协同的控制链路,这种深度耦合消除了各系统独立运行时的信息壁垒,提升了整体调节的连贯性。(2) 与区域能源网络的协同模式从被动响应转向主动参与,通过构建多能互补控制中枢,实时解析风电、光伏的出力波动特征,将其转化为

机组调节的前瞻信号,使水电出力既能快速填补新能源发电的瞬时缺口,又能通过预存库容能量平抑长周期波动,在更大范围的电力平衡中承担起灵活调节的枢纽角色,这种协同模式拓展了水电在新型电力系统中的功能边界。(3)控制架构向分布式智能协同演进,打破传统中央集权式决策模式,在各机组控制单元植入轻量化智能代理,这些代理通过共识算法实现负荷分配的分布式决策,可根据各自实时状态自主协商调节份额,在减少中央节点计算压力的同时,提升系统在局部故障情况下的容错能力,使控制指令的执行效率与可靠性得到同步增强。

3.3 绿色环保技术融合

(1)水力损失溯源与优化技术正与生态流量调控深度结合,通过在尾水管出口部署水流形态监测阵列,捕捉机组不同出力下的流场结构变化,将监测数据与下游河道水文敏感区的生态响应模型关联分析,使导叶调节策略在优化水能利用效率的同时,能主动规避可能引发河道冲刷或淤积的不利流态,实现发电过程与水域生态保护的动态平衡。(2)机组运行的能量损耗分析向全生命周期绿色化延伸,在控制算法中深度嵌入材料疲劳与水能损耗的耦合模型,精准模拟不同工况下的损耗情况。通过优化导叶调节速率与负荷变化梯度,有效减少机组运行中的机械能耗与水力损失。将设备维护能耗参数纳入决策,使机组服役周期综合能耗持续降低,形成贯穿设备全生命周期的节能控制体系^[3]。(3)新型环保材料与控制技术的融合催生了自适应生态友好型调节模式,水轮机过流部件采用仿生非光滑表面技术减少水流阻力时,控制算法会同步调整导叶开度曲线以适配新的水力特性,这种材料-控制的协同优化不仅提升了水能转换效率,还通过降低水流紊动强度减少了对水生生物栖息地的干扰,使技术升级过程同步实现生态效益的提升。

3.4 信息安全保障体系更加完善

(1)控制网络的安全防护从边界防御向纵深免疫演

进,通过在数据传输链路中部署动态加密与身份认证的双因子机制,使传感器与控制单元间的每帧数据都具备唯一的数字指纹,同时在边缘计算节点植入异常行为识别模型,可实时捕捉控制指令传输中的微秒级异常延迟或数据篡改痕迹,形成覆盖感知层到应用层的全链路防护网。(2)安全态势感知能力向预测性防御拓展,通过构建控制指令与系统状态的关联图谱,分析历史攻击行为在图谱中的特征轨迹,利用图神经网络预测潜在的攻击路径,在异常指令尚未到达执行单元时即启动隔离机制,这种前瞻性防御模式将安全响应窗口从被动处置提前至主动预警阶段,显著降低了安全事件的影响范围。

(3)安全与控制的协同机制正实现深度融合,在智能决策模块中嵌入安全约束因子,使负荷分配与调节策略生成过程自动规避可能引发安全漏洞的控制组合,例如在进行机组间数据交互时,算法会优先选择经过安全认证的通信链路并自动压缩敏感参数的传输维度,这种将安全属性内化为控制逻辑的模式,使系统在保持高效运行的同时具备原生的安全免疫能力。

结语

综上所述,水电厂自动发电控制技术正从传统调节向智能协同演进。数据采集的精准化、控制算法的自适应及安全体系的纵深防护,推动其在复杂工况下高效运行。未来,随着数字孪生与新能源协同的深化,该技术将在平衡发电效益与生态保护中发挥更关键作用,为新型电力系统的稳定与可持续发展提供核心支撑,展现出技术创新与绿色发展的深度融合。

参考文献

- [1]董岩,陈润尧.大型水电厂自动发电控制系统的优化设计及应用分析[J].光源与照明,2023(10):240-242.
- [2]李继平.大型水电厂自动发电控制系统负荷分配策略研究[J].水电站机电技术,2023,46(1):117-120.
- [3]张权.调整水电厂自动发电控制运行中振动区处理策略[J].百科论坛电子杂志,2024(19):85-87.