

水电厂运行效率提升策略与关键技术研究

方杨勇

(大唐陕西发电有限公司喜河厂站, 陕西 安康 725200)

摘要 在“双碳”目标引领以及新型电力系统构建的大背景之下, 水电厂作为清洁低碳能源体系中的核心构成部分, 其运行安全性、高效性以及经济性直接影响能源供给质量以及电网稳定。本文从水电厂运行系统的基本构成要素出发, 对影响运行效率的关键因素展开系统解析, 结合当下能源领域的热门技术, 设计有针对性的运行优化技术路径, 并且提出配套的管理策略, 以期通过技术与管理的共同作用, 实现水电厂运行状态的精准调控以及效能提升, 为水电厂适应新能源并网环境、发挥更大能源支撑作用提供参考。

关键词 水电厂运行系统; 水力特性; 设备运行状态; 调度运行模式

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.022

0 引言

水电是技术成熟、清洁且能控制的再生能源, 在我国能源结构中占据重要位置, 不仅是电力系统调峰调频的“稳定器”, 还是达成“碳达峰、碳中和”目标的关键依靠。随着电力体制改革推进和新能源发电规模迅速扩大, 水电厂运行面临多种挑战: 其一, 新能源发电不稳定、有波动, 对电网调峰能力要求更高, 水电厂要承担更多调节任务; 其二, 部分老旧水电厂有设备老化、控制方式落后等问题, 运行效率和安全保障能力亟需提高。在此情况下, 开展水电厂运行研究和优化, 挖掘运行潜力、提高调控水平, 对推动水电行业高质量发展、保障能源安全具有重要实际意义。

1 水电厂运行系统的基本构成要素

水电厂运行系统是由核心设备、控制系统、辅助系统和能源传输系统组成的整体, 各部分协同工作让水能变成电能并安全输出^[1]。

核心设备是能量转化的关键, 主要有水轮机、发电机和主变压器。水轮机接收引水系统送来的水流, 把水能变成机械能, 它的性能参数(如转轮效率、过流能力)直接决定了能量转化效率; 发电机和水轮机同轴相连, 把机械能变成电能, 它的励磁系统稳不稳定直接影响电能质量; 主变压器把发电机输出的低压电能升到电网输电电压等级, 让电能高效接入电网。

控制系统是水电厂运行的“指挥中心”, 以计算机监控系统为核心, 加上 PLC(可编程逻辑控制器)、SCADA(数据采集与监视控制系统)等技术, 能自动控

制机组启停、负荷调节、设备状态监测等运行环节。现在主流的控制系统能远程监控、无人值守, 通过实时收集运行数据并执行控制指令, 保证系统运行准确又稳定。

辅助系统保证核心设备安全运行, 有冷却系统、润滑系统、排水系统和消防系统等。冷却系统用循环水带走设备运行产生的热量, 防止设备过热损坏; 润滑系统给转动部件提供润滑, 减少摩擦损耗; 排水系统及时排出厂房和机组里的积水, 避免设备受潮; 消防系统针对电气设备、油系统等重点地方, 建立火灾防控体系, 保证设备和人员安全。

能源传输系统有引水系统、尾水系统和输电线路。引水系统由大坝、进水口、压力钢管等组成, 把水库里的水准确送到水轮机, 它的过流能力和压力稳定性影响水轮机工况; 尾水系统把水轮机排出的水引到下游河道, 保证水流循环; 输电线路把升压后的电能送到电网, 它的传输效率和可靠性决定了电能最终利用效果。

各部分相互关联、相互影响, 任何一个环节出问题都可能影响整个水电厂运行效能, 所以明确各部分的功能和运行特点是进行运行优化的基础。

2 水电厂运行效率的影响因素解析

2.1 水力特性因素

水力特性是影响水电厂运行效率的主要自然因素, 主要表现在水头变化、水流情况及水质状况三方面。水头是水轮机运行的主要动力参数, 等于水库水位和

作者简介: 方杨勇(1976-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 水轮发电机运行。

尾水位的差值。水库水位因季节降水等因素会有变化，偏离设计水头时，水轮机工作状态变差，效率降低，还可能产生汽蚀等问题；尾水位受下游河道水位等影响，升高或降低都会影响水轮机运行。水流情况包括流速等，不规则水流会增加阻力，降低水能利用效率，还可能引发振动；含沙量影响设备寿命和效率，高含沙水流会磨损部件，使效率降低。水质状况除含沙量外，污染物会腐蚀部件，藻类会降低冷却效果^[2]。所以，掌握水力特性规律并针对性控制是提升效率的关键。

2.2 设备运行状态因素

设备运行状态是决定水电厂运行效率的内部主要因素，设备健康程度、老化情况及维护效果直接影响其运行性能。核心设备长时间运行会因磨损等原因出现性能降低，如转轮磨损、定子绕组绝缘老化会使效率降低、电能输出质量下降。设备运行负荷和启停次数也影响效率，低负荷运行会偏离最佳效率区，频繁启停会增加损耗、消耗多余能量。另外，设备维护效果很重要，定期维护能处理故障、恢复性能，维护不好或不及时会降低效率，还可能引发事故。例如：导水机构接力器卡住会降低发电效率。

2.3 调度运行模式因素

随着新能源接入电网规模变大，电网对水电厂调峰调频能力的要求更高，调度方式需要从“经验驱动”变为“数据驱动”，如果不能实时整合多种数据，就难以制定最佳计划。另外，调度指令执行效率也影响运行效率，信息延迟会让机组工况调整变慢。为显示差异，对比传统和智能调度方式核心指标（见表1）。从表1可知，智能调度方式在关键指标上比传统方式好，它通过整合多种数据和用智能算法优化来精准制定计划，证明了优化调度方式对提高水电厂运行效率的重要作用^[3]。

3 水电厂运行优化的技术路径设计

3.1 基于数字孪生的运行状态精准调控技术

数字孪生技术是现在工业领域常用技术，它通过建立和实际水电厂完全对应的虚拟数字模型，实现对运行状态的实时观察、仿真研究和准确控制，给水电厂运行优化提供关键技术帮助。数字孪生模型的建立要整合多种数据，有设备三维几何模型数据、运行历

史数据、实时观察数据（像设备振动、温度、压力、流量等）、水力特性数据以及电网调度数据等，通过数据中台完成数据的统一收集、清理和融合，给模型运行提供数据支持。

在实时观察方面，在水轮机、发电机、压力钢管等关键设备以及引水系统、冷却系统等关键环节布置物联网传感器，结合边缘计算技术，实现运行数据的实时收集和本地分析，把异常数据及时传到数字孪生平台，平台通过对比虚拟模型和实际设备的运行参数，准确发现设备故障隐患和运行偏差。在仿真研究方面，数字孪生平台能依据实时数据模拟不同运行情况下的系统反应，如模拟水头波动、负荷变化时水轮机的效率变化情况，或者模拟设备故障对整个系统运行的作用，通过仿真结果优化运行策略。在准确控制方面，数字孪生平台结合智能控制算法，根据电网调度要求、水力特性变化和和设备运行状态，自动生成最佳控制指令，如调整导叶开度、优化励磁参数等，实现水轮机运行情况的实时优化，保证机组一直处于最佳效率范围^[4]。此外，数字孪生技术还能用于设备全生命周期管理，通过模拟设备老化过程，预测设备剩余寿命，给维护计划制定提供科学依据，防止过度维护或维护不够，降低维护成本。

3.2 水轮机与发电机的智能优化改造技术

核心设备性能提升是提高水电厂运行效率的直接办法。针对水轮机和发电机的智能优化改造要结合设备运行情况和先进技术，实现性能提升和智能化升级。

水轮机优化改造主要关注转轮和导水机构。转轮是水轮机能量转化的关键部件，其形状设计直接影响效率。用CFD（计算流体动力学）技术重新优化转轮形状，结合3D打印技术制造高精度转轮，能有效提高转轮的过流能力和抗汽蚀性能，让水轮机在更宽的水头和负荷范围保持高效率。导水机构优化采用智能伺服控制系统，取代传统机械控制方式，实现导叶开度准确、快速调节，减少因导叶调节延迟造成的效率损失。同时，智能伺服系统能实时监测导叶运行状态，及时发现卡涩、磨损等问题，保证导水机构稳定运行。

发电机优化改造重点在励磁系统和冷却系统。励磁系统采用智能励磁调节器，结合模糊控制、PID控制等先进算法，实现励磁电流准确调控，确保发电机输

表1 不同调度模式下水电厂运行关键指标对比

调度模式	负荷响应时间	水轮机平均效率	弃水率	单位电能耗水量
传统经验调度	≥ 5 min	75% ~ 82%	3% ~ 5%	3.8 ~ 4.2 m ³ /(kW·h)
数据驱动智能调度	≤ 1 min	85% ~ 90%	≤ 1%	3.2 ~ 3.6 m ³ /(kW·h)

出电能的电压和频率稳定,同时提高发电机的调峰调频能力。冷却系统优化采用智能温控系统,结合热管冷却、强制通风冷却等高效冷却技术,实时监测发电机定子、转子的温度变化,根据温度数据自动调节冷却强度,避免过度冷却造成能量浪费,同时防止冷却不足导致设备过热,提高发电机运行效率和寿命。此外,在设备改造过程中,可安装状态监测传感器和智能诊断模块,实现设备运行状态自我感知、自我诊断,为运行优化和维护提供数据支持。

3.3 基于 AI 算法的负荷智能调度技术

负荷调度的智能优化是适应新能源接入电网环境、提高水电厂运行效率的关键。基于 AI 算法的负荷智能调度技术通过整合多种数据,实现调度策略的准确制定和动态调整。该技术的关键是建立多目标优化调度模型,目标有最大化发电效率、最小化弃水率、满足电网调峰需求和保障设备安全等。模型的输入数据包括上游来水预测数据、电网负荷需求数据、新能源发电预测数据(如风电、光伏发电量)、设备运行状态数据和水文气象数据等。

为提高数据预测的准确性,使用 LSTM(长短期记忆网络)、GRU(门控循环单元)等深度学习算法,分别对上游来水和新能源发电出力进行准确预测。其中上游来水预测结合历史水文数据、实时降水数据和气象预报数据,新能源发电预测结合历史出力数据、天气预报数据及光伏板/风机运行状态数据,通过多模型融合提高预测精度,为调度决策提供可靠基础。

在调度策略生成方面,采用遗传算法、粒子群优化算法等智能优化算法,对多目标优化模型进行求解,生成最优的机组启停计划和负荷分配方案。例如:在新能源发电高峰期,算法可自动减少水电出力,优先使用新能源电能,同时避免弃水;在电网负荷高峰期,算法可根据设备状态和水力特性,优化各机组的负荷分配,使总出力最大化,满足电网需求。此外,负荷智能调度系统需与电网调度中心实现数据连接,实时接收电网调度指令,动态调整调度策略,确保水电厂运行与电网需求相匹配,提高电网整体运行效率。同时,通过建立调度效果评估体系,对调度策略的执行效果进行实时评估,根据评估结果不断优化 AI 算法参数,提高调度模型的适应性和准确性。

3.4 水电与新能源的协同运行优化技术

在新的电力系统中,水电和新能源协同运行是提高能源使用效率、保证电网稳定的重要方法。其关键是利用技术让两者优势互补,减少新能源发电不稳定

对电网的影响,同时提高水电厂的运行效果。协同运行的优化技术主要有风光水协同运行技术和储能协同优化技术。风光水协同运行通过建立联合调度平台,整合水电厂、风电场、光伏电站的数据,用 AI 预测算法准确预测风光发电和上游来水情况,制定协同调度策略^[5]。

当风光发电量增加时,减少水电发电,把多余的电送到电网,同时利用水电厂水库的调节能力,在风光发电少时增加水电发电,填补供电不足,保证能源供应稳定。储能协同优化技术是在水电厂建储能系统(如抽水蓄能、电化学储能),实现电能的时空转移,当风光发电过多或水电厂负荷低时,把多余的电存入储能系统;当风光发电不足或电网负荷高时,储能系统放电,和水电协同满足电网需求,储能系统还能帮助水电厂提高调峰调频能力,减少机组启停次数,降低运行损耗。此外,协同运行优化技术还要解决水电和新能源之间的通信延迟、数据不同等问题,通过建立统一的能源互联网平台,实现多能源主体的数据共享和协同控制,提高整体运行效率。

4 结束语

在“双碳”目标以及新型电力系统构建的时代背景下,水电厂运行优化已成为保障能源安全以及提升能源利用效率的关键课题。本研究对水电厂运行系统的内在机理展开深入细致剖析之后,从数字孪生、设备智能改造、AI 调度以及多能协同等多个维度提出创新技术路径,并且融合管理策略形成系统性解决方案,为破解水电厂所面临的调峰压力、设备老化等现实挑战提供理论参考。通过技术与管理协同创新推动水电行业朝着智能化、低碳化方向转型,对于构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系有深远的战略意义以及实践价值。

参考文献:

- [1] 李华取,周娜,吴滇宁,等.考虑收益风险的水电厂优化报价策略[J].水电能源科学,2023,41(06):216-220.
- [2] 唐世骥,王义.新形势下集控水电厂经济运行工作变化与对策[J].水电站机电技术,2022,45(10):173-176.
- [3] 刘正春.水电厂安全生产环境多级可拓评价研究[J].科技创新与应用,2022,12(26):81-85.
- [4] 彭俊先.大中型水电厂剪断销剪断保护优化设计[J].红水河,2022,41(03):143-147.
- [5] 陈超.浅析洪江水电厂降低综合厂用电率的控制措施[J].水电站机电技术,2022,45(06):88-89,102.