

水电厂水轮机调速系统的自动化控制策略优化

唐 纲

华蓥市地方电力有限责任公司 四川广安 638610

摘 要：水轮机调速系统作为水电厂运行控制的核心组成部分，其自动化控制策略的优劣直接关系到机组运行的稳定性、经济性以及电网的安全可靠。本文针对水电厂水轮机调速系统的自动化控制策略优化展开研究。首先，阐述了水轮机调速系统自动化控制的重要性及当前面临的挑战；其次，深入分析了现有控制策略在动态响应、抗干扰能力、参数适应性等方面存在的不足；在此基础上，从控制算法改进、控制参数自整定、多工况自适应控制以及智能化协调优化等多个维度，系统探讨了优化调速系统自动化控制策略的关键技术路径与方法；最后，对优化策略的应用前景及进一步研究方向进行了展望，旨在为提升水电厂水轮机调速系统的控制性能与运行水平提供理论参考与技术支持。

关键词：水电厂；水轮机；调速系统；自动化控制

引言

水轮机调速系统是水电厂实现机组转速和出力精确控制的关键设备，在保障机组安全稳定运行、参与电网调频调峰以及提高发电经济效益等方面发挥着至关重要的作用。随着电力系统向着智能化、自动化方向的快速发展，以及对水电厂运行可靠性、经济性和响应速度要求的不断提高，传统的水轮机调速系统控制策略在复杂工况适应性、动态调节品质、抗干扰能力以及与电网调度的协调配合等方面逐渐显现出局限性。因此，对水电厂水轮机调速系统的自动化控制策略进行深入研究及优化，以提升其控制精度、响应速度、稳定性和鲁棒性，已成为当前水电厂自动化领域亟待解决的重要课题。

一、水轮机调速系统的非线性特性与控制难点分析

（一）水轮机调节对象的复杂动态特性

水轮机调速系统所控制的调节对象，即包含引水系统、水轮机及发电机在内的水力-机械-电气耦合系统，其动态特性表现出固有的复杂性与非线性。这种复杂性首先源于水力系统中的“水锤效应”。当导叶开度快速变化以调整输出功率时，压力引水管道内的水流流速发生改变，从而引发压力的剧烈瞬变。这种压力波动不仅与导叶开度的变化率相关，还与管道长度、水体惯性及水头高度等物理参数紧密耦合，导致水轮机的输入力矩与导叶开度之间呈现出显著的非线性、时滞及振荡特性。其次，水轮机自身的能量转换特性也是非线性的。其输出力矩和效率是水头、流量和转速的多元非线性函数，在不同运行点（如空载、满载、部分负荷）其传递函数

参数差异巨大。这种复杂的动态特性意味着，基于单一工作点线性化模型设计的传统PID控制器，在系统偏离设计工况时，其控制性能会急剧下降，甚至可能因无法有效抑制水锤效应而诱发系统振荡，这是实现高精度、高稳定性控制的首要难点^[1]。

（二）系统运行工况多变带来的控制难题

水电厂在实际运行中，其工况并非恒定，而是根据电网需求、来水条件及机组状态频繁切换，这种多变性给调速系统的控制带来了严峻挑战。机组需要在不同水头下运行，从汛期的高水头大流量到枯水期的低水头小流量，水轮机的特性曲线会发生显著变化，要求控制器具备强大的自适应能力以适应模型参数的漂移。同时，机组频繁经历开机、并网、增减负荷、甩负荷及停机等瞬态过程。例如，在甩负荷工况下，调速系统必须在极短时间内快速关闭导叶以防止机组飞逸，同时又要极力抑制水锤效应带来的压力管道破坏风险，这是一种典型的强非线性、多目标、多约束的极限控制问题。此外，抽水蓄能机组还需在发电、抽水、调相、静止等多种工况间转换，每种工况下的控制目标和系统动态响应特性均不相同。这种运行工况的复杂多变，要求控制策略必须具备鲁棒性和自适应性，能够在线识别系统状态并调整控制参数，否则难以在全工况范围内保证系统的动态品质与安全稳定。

（三）电网稳定性对调速系统性能的高要求

随着电力系统向大规模新能源接入和特高压远距离输电方向发展，电网的稳定性问题日益突出，对水轮机调速系统的性能提出了远超以往的高要求。水电厂因其

机组启停迅速、出力调节灵活，在电网中承担着重要的调频、调峰和事故备用任务。调速系统作为水轮机组的核心控制单元，其响应速度与调节精度直接关系到电网的频率质量。在电网频率发生扰动时，调速系统必须快速、准确地调整机组出力，以提供一次调频服务，这就要求其具备快速的动态响应和良好的阻尼特性。更进一步，现代电网中存在的低频振荡问题，要求水轮机调速系统不仅不能恶化振荡，还应能提供额外的正阻尼，即参与电力系统稳定器（PSS）的功能，通过优化控制策略为电网提供动态支撑。这种对电网稳定性的支撑作用，要求调速系统的设计必须超越单纯跟踪转速给定值的传统范畴，需综合考虑机组动态与电网动态的交互影响，实现从“机组稳定”到“电网稳定友好”的控制理念升级，这对控制策略的复杂性和智能化水平提出了极高的要求^[2]。

二、现代自动化控制策略在水轮机调速中的应用方向

（一）自适应与鲁棒控制策略的应用

针对水轮机调节对象固有的非线性、时变特性以及运行工况的多样性，自适应与鲁棒控制策略的应用成为提升调速系统性能的关键技术路径。自适应控制的核心价值在于其能够在线辨识系统模型参数的变化，并实时调整控制器参数，以适应系统动态特性的漂移。例如，模型参考自适应控制（MRAC）通过构建一个理想的参考模型，迫使被控系统的输出始终跟踪该模型的动态响应，从而在水头变化或导叶非线性开度变化时，依然能保持一致的动态性能。而鲁棒控制则侧重于处理系统中的不确定性，如模型未建模动态和外部扰动。通过 H_∞ 控制或 μ 综合等方法设计的控制器，能够在最坏情况下保证系统的稳定性和性能指标，即对一定范围内的参数摄动和外部干扰不敏感。将自适应与鲁棒策略相结合，可以构建出既能适应大范围工况变化，又能有效抑制未知扰动的复合控制结构，其学术与工程价值在于，它为解决水轮机调速系统在全工况范围内的鲁棒稳定性和高性能控制问题提供了系统性的理论框架和实现途径。

（二）智能控制策略的融合与发展

智能控制策略，特别是模糊逻辑、神经网络等不依赖于精确数学模型的控制方法，为处理水轮机调速系统的高度非线性和不确定性提供了全新的解决思路。模糊控制的优势在于能够将专家的经验知识和操作人员的直觉判断转化为一系列模糊规则，从而模拟人的决策过程。在水轮机调速中，可以建立“转速偏差大则快速调节导叶”、“转速变化快则提前施加制动”等模糊规则库，

实现对复杂工况的快速、非线性响应，有效克服了传统PID控制器在非线性和非线性区域调节效果不佳的缺陷。神经网络控制则凭借其强大的非线性映射能力和自学习能力，能够通过离线训练或在线学习，逼近水轮机系统的复杂动态逆模型，从而实现精确的动态补偿或直接作为控制器。更进一步，将模糊逻辑与神经网络、遗传算法等相融合，形成模糊神经网络、进化模糊系统等混合智能控制策略，能够兼具各自的优点，如利用神经网络优化模糊规则的隶属度函数，或利用遗传算法优化控制器的参数。这类智能控制策略的深层价值在于，它突破了传统控制理论对精确数学模型的依赖，为处理结构复杂、机理不清的工业过程控制问题提供了更灵活、更强大的工具，推动了控制理论与工程实践的深度融合^[3]。

（三）预测控制与多目标协调控制的实现

模型预测控制（MPC）作为一种基于模型的优化控制策略，在处理多变量耦合和约束问题方面展现出独特优势，非常契合水轮机调速系统的现代控制需求。MPC的核心机制是在每个控制周期内，基于系统的动态模型预测未来一段时间内的系统状态，并通过求解一个有限时域内的在线优化问题，来确定当前时刻的最优控制输入。在水轮机调速应用中，MPC能够显式处理导叶开度速率、开度限幅、水压波动范围等物理约束，避免传统控制中因饱和或超调引发的不利动态。同时，通过在优化目标函数中引入多个控制目标，MPC可以自然地扩展为多目标协调控制。例如，目标函数可以同时包含转速跟踪误差最小化、导叶动作损耗最小化以及水锤效应抑制等多个项，通过权重系数的调整，实现不同工况下控制目标的动态平衡。这种控制策略的先进性体现在，它将控制问题从单纯的反馈校正提升为基于预测的前馈-反馈协同优化，不仅能够保证系统的闭环稳定性，还能在满足各种复杂约束的前提下，实现系统全局性能的最优化。这对于提升水电厂运行的经济性、安全性和对电网的支撑能力具有重大的实践价值。

三、调速系统控制策略优化的实现路径与性能提升

（一）基于状态反馈的动态性能优化

基于状态反馈的优化需实时采集水轮机调速系统关键状态量（转速偏差、导叶开度、蜗壳水压、接力器行程），通过多变量反馈调节控制器参数，减少动态响应滞后与超调，嘉陵江流域中型水电厂（装机容量 $2 \times 25\text{MW}$ ，混流式水轮机，原调速系统采用常规PID控制，动态响应超调量大、调整时间长）的优化实践，通过加装高精度传感器（转速传感器精度 $\pm 0.01\%$ 、水压

传感器量程0~1.6MPa,精度0.2级),实时采集4类状态量并传输至PLC控制系统;基于状态反馈原理,在原有PID控制基础上增加“转速偏差-导叶开度变化率”交叉反馈环节,调整比例系数(从8.5调至6.2)、积分时间(从1.2s调至0.8s)、微分时间(从0.3s调至0.5s),抑制蜗壳水压波动对转速的影响。优化后,水轮机转速超调量从原12%降至4.5%,转速调整时间(从扰动发生到稳定在额定转速 $\pm 0.2\%$ 范围内)从7.8s缩短至3.2s,完全符合《水轮机调速器技术条件》(GB/T 9652.1-2019)中“转速超调量 $\leq 5\%$ 、调整时间 $\leq 5s$ ”的要求,动态响应速度显著提升^[4]。

(二) 多控制模式间的平滑切换与协同

多控制模式(并网运行模式、孤网运行模式、手动控制模式)的平滑切换需通过模式切换前的状态预调节、切换过程中的前馈补偿,避免切换时转速或负荷波动,该水电厂原模式切换存在明显扰动:并网切孤网时,转速最大波动 $\pm 0.6\%$,负荷波动 $\pm 8MW$,切换过程需操作人员手动干预;优化后采用“预同步调节+动态前馈补偿”策略:切换前1s,控制系统根据目标模式的参数要求(如孤网模式下额定转速50Hz、负荷稳定值15MW),预调节导叶开度至目标值的90%;切换过程中,通过前馈补偿模块实时修正导叶开度(补偿量根据模式切换时的转速偏差动态计算,最大补偿量 $\pm 3\%$),避免参数突变。同时,在控制程序中设置模式切换过渡函数(采用指数曲线过渡,过渡时间0.8s),实现控制指令的连续变化。优化后,并网与孤网模式切换时,转速波动缩小至 $\pm 0.15\%$,负荷波动缩小至 $\pm 2MW$,切换过程无需人工干预,切换成功率从原88%提升至100%,解决了模式切换导致的系统不稳定问题。

(三) 优化策略对系统动态品质与稳定性的提升

优化策略需通过改善调速系统动态品质指标(如超调量、调整时间、阻尼比),增强系统抗扰动能力与长期运行稳定性,该水电厂通过状态反馈优化与多模式协同控制,对系统动态品质与稳定性进行全面验证:在2021年7月的负荷扰动试验中,施加20%额定负荷(5MW)阶跃扰动,优化前系统转速最大偏差0.9%,恢复至稳定范围需11.5s,阻尼比0.22(易出现低频振荡);优化后转速最大偏差0.25%,恢复时间5.8s,阻尼比提升至0.38(符合《水力发电厂自动化设计技术规范》DL/T 5065-2019中“阻尼比 ≥ 0.3 ”的稳定要求)。长期运行数据显示,2021年8月至2022年2月,优化后的调速系统累计运行4320小时,因动态响应问题导致的机组降负荷次数从

优化前的每月3次降至0次,机组并网发电稳定性提升,月均发电量较优化前增加120万kWh(根据水电厂2022年年度生产报告,优化前月均发电量2880万kWh,优化后达3000万kWh),直接提升电厂经济效益与供电可靠性^[5]。

结语

水电厂水轮机调速系统的自动化控制策略优化是一个复杂而重要的课题。从水轮机调节对象的复杂动态特性,到系统运行工况多变带来的控制难题,再到电网稳定性对调速系统性能的高要求,每一个环节都对控制策略提出了严峻挑战。现代自动化控制策略的应用方向表明,自适应与鲁棒控制、智能控制以及预测控制等方法为解决这些问题提供了新的思路和技术手段。通过基于状态反馈的动态性能优化、多控制模式间的平滑切换与协同,以及优化策略对系统动态品质与稳定性的提升,可以显著改善调速系统的性能。这些优化措施不仅提高了系统的响应速度和稳定性,还增强了其在不同工况下的适应能力,从而提升了水电厂的整体运行效率和经济效益。未来,随着技术的不断进步,调速系统的控制策略将更加智能化和精细化,为电力系统的安全稳定运行提供更强有力的支持。

参考文献

- [1]张兴斌,黄安国,孙勇.高坝洲水电厂轴流转桨式水轮机组调速器抽动故障研究分析[J].水电与新能源,2020,34(5):6.DOI:CNKI:SUN:HBFD.0.2020-05-013.
- [2]丁占涛,蔡卫江,赵文利,等.智能水轮机调速器的调节策略优化与实践[C]//中国水力发电工程学会自动化专委会2021年年会暨全国水电厂智能化应用学术交流会.1.国家能源集团新疆开都河流域水电开发有限公司;2.南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院),2021.
- [3]易建波,张国洲,张鹏,等.超低频振荡阻尼控制中的水轮机调速系统参数双层优化策略[J].电工技术学报,2022(037-005).
- [4]贾鑫,于爽,蔡卫江,等.双调节水轮机甩负荷低频灭磁的调速器控制策略研究[C]//中国水力发电工程学会自动化专委会2022年年会暨全国水电厂智能化应用学术交流会.1.河北丰宁抽水蓄能有限公司;2.南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院),2022.
- [5]王聪.水轮机调速系统优化控制及智能化研究[D].中国水利水电科学研究院,2021.