水力发电机组调速系统性能优化策略分析

胡开成

（四川大唐国际甘孜水电开发有限公司，四川 甘孜 626000）

摘 要 水电作为清洁可再生能源，在电力供给架构中占据重要地位。调速系统是水力发电机组调控转速、负荷的关键装置。受设备老化、参数匹配失衡、运维方式滞后、工况多变等因素影响，部分机组调速系统出现响应滞后、波动偏大、调节精度不足等问题，干扰发电输出稳定性。本文结合水电厂实际运行工况，分析调速系统运行现状与现存问题，从参数整定、硬件改造、控制逻辑、运维模式四个方向开展性能优化，搭配数据表格对比优化成效，旨在降低机组运行故障，维持水电负荷平稳输出，为同类型机组运维升级提供参考。

关键词 水力发电机组；调速系统；性能优化；平稳输出；水电运维

中图分类号：TK730.4+1；TM312 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.040

0 引言

我国水电资源储量丰富，水电工程凭借污染低、调度灵活、调峰能力强等优势，成为电网调峰、调频、调压的重要支撑。水力发电机组依靠调速系统完成转速控制与负荷调节，系统运行状态直接决定机组并网稳定性、电能质量以及机组使用寿命[1]。现阶段不少投运多年的水电机组，调速装置长期高负荷运转，加之现场工况复杂、外部电网负荷频繁波动，系统各类性能缺陷逐步显现。因此，针对水力发电机组调速系统开展系统性性能优化，改善设备调节能力与运行状态，对保障水电持续平稳出力、维护区域电网安全运行具有重要的现实价值。

1 水力发电机组调速系统运行特征及现存问题

1.1 调速系统基本运行特征

水力发电机组调速系统主要分为机械液压型、电气液压型、数字智能型三类，目前存量机组以电液调速器与数字调速器为主，整体运行具备三类典型特征。

第一，工况联动性强。系统调节动作并非独立运行，调节指令下发后，会同步作用于导水机构、压力管道、水轮机转轮，水流变化、机械动作、电气参数相互影响，管道水锤、水流惯性都会制约调速响应速度[2]。

第二，动态调节范围广。水电厂需配合电网完成日间调峰、夜间填谷，同时应对用电高峰、线路检修、负荷突变等场景，调速系统需要在空载、并网、满负荷、变负荷等多种工况间频繁切换，调节幅度与动作频次处于较高水平。

第三，运行环境影响显著。水电站多处于山区，水头随季节、降雨量产生明显变化，高水头、低水头工况下，水流动力特性不同，同一套调速参数难以适配全部工况，容易出现调节效果偏差。

除此之外，机房温湿度、液压油品质、电磁阀灵敏度等现场条件，也会持续作用于调速系统，改变设备运行状态。

1.2 调速系统运行过程中的主要问题

结合现场巡检、试验记录与故障台账来看，当前水电发电机组调速系统普遍存在性能衰减、调节异常、运维短板等问题，直接影响机组出力平稳性。

第一，控制参数适配性不足。机组投运初期整定的调节参数，仅匹配设计工况，长期运行后设备机械间隙增大、液压元件老化，原有参数无法适配变水头、变负荷工况，出现转速波动大、负荷调节超调、振荡等现象[3]。

第二，硬件部件性能下降。液压阀组、伺服机构、位移传感器、油泵等元件长期磨损老化，出现内泄、卡涩、信号采集失真等故障，造成调速指令执行延迟、动作不到位，机组负荷难以稳定在设定区间。

第三，控制逻辑存在局限。部分老旧调速系统控制程序老旧，未针对孤网运行、电网扰动、突发甩负荷等特殊工况增设保护逻辑，极端工况下易出现调节失控。

第四，日常运维模式粗放。运维人员多侧重故障事后维修，缺少常态化性能检测与预防性调校，系统

作者简介：胡开成（1990-），男，本科，工程师，研究方向：发电运行管理。

微小缺陷不断累积，逐步演变为影响发电输出的重大隐患。

2 水力发电机组调速系统全维度性能优化方案

2.1 分工况开展调速系统参数整定优化

参数整定是改善调速系统动态调节性能最直接的手段，摒弃传统单一工况参数设置模式，按照不同水头、不同运行状态划分区间，开展差异化参数匹配。首先开展机组水力特性摸底试验，分别在高水头、中水头、低水头三种自然条件下，完成机组空载扰动、负荷扰动、甩负荷试验，记录转速变化、导叶动作、负荷响应等全过程数据。其次依据试验数据，针对性调整比例增益、积分时间、微分时间、暂态转差系数等关键参数。高水头工况下水流冲击力强，适当降低比例增益，避免调节动作过激引发振荡；低水头工况水流动力偏弱，小幅提升响应参数，缩短调节滞后时长。完成参数初步整定后，进行连续 72 小时带负荷试运行，实时监测机组转速、出力曲线，针对短时波动区间再次微调参数，保证参数与现场水力条件、机组机械状态高度匹配。同时，建立参数台账，区分常态并网、孤网运行、调峰调频等场景，留存多套备用参数，实现工况切换时快速调用[4]。

2.2 实施硬件部件升级与液压回路改造

针对元件老化、卡涩、内泄等硬件类故障，分模块完成部件更换与油路改造，提升系统执行精度与可靠性。对于使用年限超过十年的电磁换向阀、主配压阀、伺服油缸，选用耐磨、密封性能更强的同规格工业级元件进行替换，减少机械卡涩与液压内泄问题。全面梳理液压油循环回路，更换老化油管、密封垫片，在主油路、分支油路增设高精度过滤装置，阻挡杂质进入精密阀组。

定期更换符合工况要求的抗磨液压油，严格把控油液清洁度、黏度、抗氧化指标，防止油液劣化造成元件磨损。对转速传感器、导叶位移传感器等信号采集装置进行校验与升级，将老旧模拟量传感器更换为数字式传感设备，强化信号抗干扰能力，降低信号失真、断连概率。针对油压系统，优化油泵启停逻辑与稳压装置，维持系统油压稳定，避免油压波动影响导水机构动作精度，从硬件层面消除调节执行环节的缺陷。

2.3 完善调速系统控制逻辑与保护程序

依托现有数字调速器硬件基础，对内部控制程序、联锁保护逻辑进行补充完善，强化系统应对复杂工况与突发故障的处置能力。

一方面，优化常规调节逻辑，增加负荷平滑过渡算法，在电网负荷增减、机组启停过程中，控制导叶开关速率，避免出力骤升骤降，减小对电网与机组本体的冲击。

另一方面，补充特殊工况控制逻辑，针对甩负荷、线路故障、外部电网剧烈扰动等场景，增设分级调节程序，当转速、负荷偏离设定阈值时，系统分步执行调节动作，而非一次性大幅调整。完善软硬件故障联锁保护，当传感器信号异常、油压过低、阀组动作超时等问题出现时，系统先发出声光告警，同步执行稳态调节，故障无法解除时再按照预设程序平稳停机，杜绝突发紧急停机造成电力输出中断。完成逻辑修改后，借助仿真平台与现场模拟试验反复验证，确保新增程序运行稳定，不存在逻辑冲突。

2.4 构建适配调速系统的精细化运维模式

优质的运维管理可以延缓设备性能衰减，降低故障发生概率，结合调速系统结构与运行规律，建立预防为主、修试结合的精细化运维体系。划分日常巡检、定期试验、专项检修三类工作内容，日常巡检重点查看油压、油位、设备温度、管路渗漏、信号指示灯状态，做好实时记录；每周对滤网、润滑部位进行清理养护，每月开展一次小范围扰动试验，抽检系统调节性能。

每季度开展全套调速系统静态、动态试验，对比历史运行数据，判断设备性能变化趋势，提前排查潜在缺陷。制定部件寿命管理清单，根据元件磨损规律，提前规划易损件更换周期，做到到期更换、防患于未然。同时，加强运维人员技能培训，讲解不同工况下参数调整方法、故障判断思路、应急处置流程，提升人员实操能力，改变以往故障后被动维修的模式，让调速系统长期维持良好运行状态。

3 调速系统优化后的运行效果及质量保障管控

3.1 优化前后运行数据对比分析

为直观体现优化成效，选取同一台机组、相同水头区间、相近电网负荷条件，采集优化前后连续一个月的运行数据，重点对比转速波动率、负荷调节响应时间、故障发生次数三项核心指标。如表 1 所示，为优化前后关键运行指标对比情况。

从表 1 数据可以看出，经过系统性优化后，调速系统各项运行指标均得到明显改善，转速、负荷波动被控制在极小范围，设备故障大幅减少，机组电力输出的连续性与稳定性显著提升。在低水头、负荷频繁波动的极端工况下，系统也未出现振荡、卡涩等问题，整体调节性能满足生产运行要求。

表1 调速系统优化前后机组运行指标对比

监测指标	优化前运行数值	优化后运行数值	指标变化说明
机组转速波动率	±0.82%	±0.26%	转速波动范围大幅缩小，运行更平稳
负荷调节平均响应时间	2.1 s	0.7 s	指令响应速度显著提升，滞后问题改善
月度故障发生次数	8次	1次	故障频次大幅下降，设备稳定性增强
负荷调节超调率	11.3%	2.9%	调节超调现象基本得到遏制

3.2 搭建全天候在线运行监测体系

依托水电厂现有的机组监控系统，接入调速系统油压、导叶开度、转速、负荷、元件状态等实时数据，搭建全天候在线监测平台。平台自动绘制转速曲线、负荷曲线、油压变化曲线，运维人员可在中控室实时查看系统运行状态。

设置多级预警阈值，当转速波动、油压数值、响应时长接近警戒范围时，平台自动弹窗提醒，并标注异常点位与关联部件。监测数据实行云端连续存储，留存周期不低于一年，便于后期调取分析设备性能变化规律。夜间、节假日等值守力量薄弱时段，依靠在线监测实现无人值守状态下的自动监控，第一时间发现微小异常，避免小问题逐步扩大，持续保障机组稳定出力[5]。

3.3 严格执行定期试验与性能校验制度

将调速系统试验工作纳入电厂标准化作业流程，明确试验项目、试验周期、操作标准与验收要求。常规试验包含空载扰动试验、带负荷扰动试验、导叶行程试验、油压稳定性试验，按照月度、季度、年度分级开展。试验过程全程录像、留存原始数据，试验完成后出具正式试验报告，对比标准指标判定系统性能是否合格。

若试验发现调节精度、响应速度不达标，立即分析问题根源，区分是参数偏移、元件老化还是油路问题，第一时间开展二次调校或部件检修。试验工作做到不简化流程、不降低标准，以周期性试验把控设备性能状态，确保调速系统调节能力始终符合电网运行与安全生产要求。

3.4 建立缺陷闭环管理与负荷动态适配机制

针对运行、试验、巡检过程中发现的各类缺陷，建立发现、登记、处置、复检、销号的闭环管理流程。无论故障大小，均统一录入设备缺陷台账，明确处置责任人与完成时限，缺陷处理完毕后必须进行现场试验复检，确认问题彻底解决后方可完成销号。

结合季节变化、来水情况、电网调度指令，动态切换调速系统配套参数方案。汛期水头偏高、流量充足，启用高水头配套参数；枯水期水位下降，切换为低水头运行参数。电网下达大幅度调峰、调频任务时，提前评估负荷变化幅度，预判调节压力，必要时提前安排人员现场值守。通过负荷与参数的动态适配，让调速系统在全工况下稳定发挥作用，长久维持水电生产平稳输出。

4 结束语

本文围绕水力发电机组调速系统展开研究，总结设备工况联动、调节范围广、环境敏感度高的运行特点，梳理参数失配、硬件老化、逻辑滞后、运维粗放等实际问题，制定参数分工况整定、硬件升级改造、控制逻辑完善、运维模式优化四项改进方案，结合相关数据对比优化前后运行指标，同时搭建在线监测、定期试验、缺陷闭环、动态适配的长效管控机制。随着水电智能化改造不断推进，未来可结合数字孪生、智能算法技术，实现调速参数自主辨识、自动整定，进一步减少人工干预。持续深挖调速系统优化空间，强化设备运行可靠性，能够更好地发挥水电调峰调频作用，助力电力系统安全、稳定、高效运行。

参考文献：

[1] 王国东,江月周.木坡水电站调速器液压系统优化研究[J].四川水力发电,2026,45(02):59-62.
[2] 杨年浩,陆杰,李海军,等.尾水河道拓挖条件下水电站机组稳定性分析及运行策略优化研究[J].水电能源科学,2026,44(04):207-210,236.
[3] 蒋蓉蓉,刘利民,续磊,等.泵站高压变频调速系统的应用与维护[J].现代制造技术与装备,2025,61(12):174-176.
[4] 陈旺林.水电站调速系统升级改造[J].电工技术,2025(24):38-40.
[5] 余振,刘平.某水电站机组有功功率异常调节的分析与处理[J].水电与新能源,2025,39(12):85-89.