

水轮机调节系统的稳定性研究

母冬

华电抽蓄工程管理(成都)有限公司, 吉林白山, 135200;

摘要: 水轮机调节系统作为水力发电站的核心控制单元, 其稳定性直接决定发电系统的安全运行、电能质量及供电可靠性。该系统通过实时调节水轮机导叶开度或桨叶角度, 响应电网负荷变化, 维持机组转速与电网频率恒定, 是连接水力机械、电气设备与自动控制的关键枢纽。本文从水轮机调节系统的组成与工作原理出发, 深入分析影响系统稳定性的核心因素, 探讨常用的稳定性分析方法, 提出针对性的稳定性优化策略, 为水轮机调节系统的设计、调试与运维提供理论支撑。研究表明, 水力扰动、机械特性偏差、控制参数不匹配及外部负荷波动是影响稳定性的主要因素, 通过合理选择调节规律、优化参数配置、改进水力设计可有效提升系统稳定性。

关键词: 水轮机; 调节系统; 稳定性; 控制参数; 优化策略

DOI: 10.69979/3060-8767.26.04.049

引言

随着电力系统向智能化、规模化发展, 电网对水电站调节性能与稳定性的要求显著提高。水轮机调节系统作为水力发电核心, 承担负荷调节、转速控制等关键功能, 其稳定性直接关乎电网频率质量与设备安全, 易受水力惯性、机械振动等因素影响, 引发振荡甚至机组跳闸。开展该系统稳定性研究, 构建科学分析与优化体系, 具有重要工程与理论价值。现有研究方法存局限性, 本文梳理系统机制、剖析影响因素, 优化分析与控制策略, 为复杂工况下的稳定性问题提供新思路。

1 水轮机调节系统的组成与工作原理

1.1 系统组成

水轮机调节系统是由机械、电气、液压、控制多子系统构成的复杂闭环控制系统, 核心组件包括测量元件、控制元件、执行机构、反馈元件及水轮机-发电机机组。测量元件采集转速、频率、导叶开度等关键参数, 将物理信号转为电气信号供控制决策; 控制元件以PID调节器、智能调节器为主, 依据参数偏差按预设规律生成控制指令; 执行机构核心为液压伺服系统, 将指令转化为机械动作, 通过调节导叶或桨叶开度改变水流流量; 反馈元件实时采集执行机构信号并反馈, 形成闭环控制以修正精度; 水轮机-发电机机组作为控制对象, 实现水、机械、电能的转化, 转速与功率随导叶开度调整。

各子系统协同制约形成完整调节回路。液压伺服系统响应快、力矩大, 但死区、滞环等非线性特性影响稳定性; 调节器的调节规律与参数配置直接决定系统动态响应, 是保障稳定性的关键环节^[1]。

1.2 工作原理

水轮机调节系统核心目标是维持机组转速(对应电网频率)恒定, 工作原理基于闭环反馈控制机制。电网负荷变化时, 机组功率与负荷失衡导致转速偏离额定值, 测量元件实时检测偏差并传输至调节器; 调节器按预设规律(如PID调节)运算处理后输出控制信号, 由液压伺服系统驱动导叶或桨叶开度变化, 调整水流流量以改变水轮机输出力矩。当力矩与负荷重新平衡, 转速恢复额定值, 反馈元件将开度信号反馈至调节器, 终止调节循环。

调节过程中需兼顾动态响应与稳态精度, 快速响应负荷变化的同时避免超调与振荡。混流式、轴流式等不同水轮机因水力特性差异, 调节机制略有不同, 但核心控制逻辑均围绕转速闭环调节展开。

2 水轮机调节系统稳定性的影响因素

2.1 水力因素

水力系统动态特性是影响水轮机调节系统稳定性的关键, 主要体现在水力惯性、水击效应及水力非线性三方面。水力惯性由引水系统容积与水流速度决定, 系统越长、容积越大, 流量变化越滞后于导叶开度调整, 易引发转速波动。水击效应是指导叶开度突变时, 管道内水流速度骤变产生压力波, 导致压力剧烈波动, 影响力矩稳定性, 严重时引发振荡。

水轮机水力非线性特性使系统模型参数时变, 导致调节器参数难以适配全工况, 工况切换时稳定性下降。此外, 引水系统几何结构、水流空化与漩涡等现象, 会加剧水力扰动, 进一步削弱系统稳定性^[2]。

2.2 机械因素

机械系统特性偏差通过影响机组转速响应与执行机构精度,进而作用于调节系统稳定性,核心因素包括转动惯量、机械摩擦与间隙、振动干扰。转动惯量决定转速变化速率,惯量越大,系统抗扰动能力越强但动态响应越慢;惯量过小则转速易受负荷波动影响,稳定性下降。

机械摩擦与间隙存在于执行机构及转动部件中,引发调节滞后、死区误差,导致静态偏差与动态振荡。机组机械不平衡、轴承磨损等故障会加剧振动干扰,干扰测量信号准确性,进一步削弱系统稳定性。

2.3 控制因素

控制系统的参数配置与调节规律是决定系统稳定性的核心,主要涵盖调节器参数、调节规律选择及控制逻辑设计。调节器参数(K_p 、 T_i 、 T_d)匹配度直接影响动态响应: K_p 过大易加剧振荡,过小则调节迟缓; T_i 过长无法消除稳态偏差,过短易致振荡发散; T_d 过大放大高频干扰,过小难抑超调。

传统PID调节适用于常规工况,复杂工况下难兼顾响应与稳定性。此外,工况切换、故障容错等控制逻辑不完善,易引发指令冲突、系统误动作,进而影响调节系统稳定性。

2.4 外部与电气因素

外部负荷波动是调节系统不稳定的直接诱因,电网负荷快速变化(如冲击负荷、负荷突变)会导致机组功率与负荷失衡,若系统响应速度不足、调节能力有限,易引发转速偏差过大及振荡。电气系统干扰同样影响稳定性,电网电压波动、频率干扰、测量信号噪声等,会干扰调节器信号采集与运算,导致控制指令失真,降低调节精度。

此外,发电机励磁系统与水轮机调节系统存在耦合关系,励磁系统动态特性会影响机组电磁力矩,进而干扰转速控制效果,两者协调不当会引发系统振荡,削弱整体稳定性。

3 水轮机调节系统稳定性分析方法

3.1 经典控制理论方法

经典控制理论方法基于线性系统模型,通过频率域与时域分析判断系统稳定性,具有理论成熟、计算简便、物理意义明确等优点,广泛应用于水轮机调节系统的初步稳定性分析。频率域分析方法主要包括伯德图法、奈奎斯特判据与尼科尔斯图法,核心是通过分析系统的频

率特性(幅频特性、相频特性),判断系统的增益裕度与相位裕度,进而评估系统稳定性:增益裕度与相位裕度越大,系统稳定性越强,反之则易出现振荡。

时域分析方法通过求解系统的微分方程,得到转速、导叶开度等参数随时间的变化曲线,通过超调量、调节时间、稳态偏差等性能指标评估稳定性。常用的时域分析指标包括:超调量(系统响应超过稳态值的最大偏差)、调节时间(系统响应达到并稳定在稳态值允许范围内的时间)、稳态偏差(系统稳定后实际值与设定值的偏差)。超调量越小、调节时间越短、稳态偏差越小,系统稳定性与调节性能越优。经典控制理论方法适用于线性化后的水轮机调节系统,对于非线性较强的系统,需先进行线性化处理,存在一定的近似误差^[3]。

3.2 现代控制理论方法

针对水轮机调节系统的非线性、时变特性,现代控制理论方法基于状态空间模型,通过分析系统的状态矩阵特征值、可控性与可观性,实现对系统稳定性的精准评估。特征值分析法是现代控制理论的核心方法,通过求解系统状态矩阵的特征值,判断系统稳定性:若所有特征值的实部均小于0,系统渐近稳定;若存在实部大于0的特征值,系统不稳定;若存在实部等于0的特征值,系统临界稳定。

此外,李雅普诺夫稳定性理论作为现代控制理论的重要分支,可直接用于非线性系统的稳定性分析,无需对系统进行线性化处理。该理论通过构造李雅普诺夫函数,根据函数的正定性与导数的负定性判断系统稳定性,适用于复杂非线性水轮机调节系统的稳定性分析。现代控制理论方法能够全面反映系统的动态特性,精度较高,但计算复杂度高,对模型的准确性要求严格。

3.3 数值仿真方法

随着计算机技术的发展,数值仿真方法已成为水轮机调节系统稳定性分析的主流手段,其核心是通过建立系统的非线性动态模型,利用仿真软件模拟不同工况下的系统响应,直观评估稳定性。常用的仿真软件包括MATLAB/Simulink、ADAMS、ANSYS等,其中MATLAB/Simulink因建模简便、模块丰富,广泛应用于水轮机调节系统的动态仿真^[4]。

在仿真分析中,需构建水轮机、引水系统、调节器、液压伺服系统、发电机等各子系统的动态模型,通过参数配置与工况设置,模拟负荷突变、水力扰动、参数波动等场景,得到转速、导叶开度、压力等参数的动态响应曲线,进而通过性能指标评估系统稳定性。数值仿真

方法能够考虑系统的非线性、耦合性与时变特性，仿真结果贴近实际运行情况，可用于复杂工况下的稳定性分析、调节器参数优化与控制策略验证，是理论分析与工程实践之间的重要桥梁。

4 水轮机调节系统稳定性优化策略

4.1 水力系统优化

水力系统优化的核心是削弱水力惯性、抑制水击效应、改善水力非线性特性。在引水系统设计中，可通过缩短引水隧洞长度、减小压力管道直径，降低水力惯性；设置调压室（如差动式调压室、气垫式调压室），吸收水击压力波，抑制压力波动，减小水击效应对系统的影响。同时，优化水轮机的水力设计，改进转轮、导叶的结构形式，改善水轮机的流量特性与力矩特性，降低水力非线性程度，使水轮机在全工况范围内保持良好的水力性能。

此外，通过优化引水系统的阀门布置、减少弯道数量，避免水流空化与漩涡现象，降低水力扰动；在运行过程中，合理控制工况切换速度，避免导叶开度突变，减小水击压力的冲击，提升系统稳定性^[5]。

4.2 机械系统改进

机械系统改进主要围绕减小机械摩擦与间隙、降低振动干扰、优化转动惯量展开。在执行机构设计中，选用高精度、低摩擦的液压伺服阀与接器，采用耐磨材料与密封结构，减小机械摩擦与死区误差；通过精密加工与装配，消除转动部件的间隙，提升执行机构的动作精度与响应速度。针对机组振动问题，优化转子动平衡设计，加强轴承润滑与磨损监测，减少机械振动对系统的干扰；合理匹配机组转动惯量，在保证动态响应速度的前提下，提升系统抗负荷波动能力。

此外，建立机械系统定期维护与检测机制，及时发现并处理部件磨损、松动等问题，避免机械故障引发的稳定性下降。

4.3 控制系统优化

控制系统优化是提升水轮机调节系统稳定性的关键手段，主要包括调节规律优化、调节器参数整定与控制逻辑改进。在调节规律方面，针对传统PID调节在复杂工况下的局限性，引入智能控制算法，如模糊PID控制、自适应PID控制、滑模控制等。模糊PID控制通过模糊逻辑规则实时调整PID参数，适配系统的非线性与

时变特性；自适应PID控制能够根据工况变化自动优化参数，提升系统的鲁棒性；滑模控制具有抗干扰能力强、响应速度快的优点，可有效抑制外部扰动与参数波动对系统的影响。

调节器参数整定需结合系统动态模型与仿真分析，采用工程整定法（如临界比例度法、衰减曲线法）、智能优化算法（如遗传算法、粒子群算法）等，实现参数的最优匹配，兼顾动态响应与稳定性。同时，优化控制逻辑设计，完善工况切换、故障容错与励磁-调速协调控制逻辑，避免指令冲突与误动作；引入滤波技术，消除测量信号噪声，提升调节器信号采集的准确性，确保控制指令的可靠性。

5 结论

水轮机调节系统稳定性是水力发电站安全高效运行的核心，受水力、机械、控制、电气多因素耦合影响。水力惯性、水击效应、机械摩擦与间隙、控制参数不匹配及外部负荷波动等，均会引发转速波动、振荡等不稳定问题。经典控制、现代控制及数值仿真方法，为不同工况下系统稳定性提供了有效分析手段。实践表明，通过优化水力设计、改进机械结构、完善控制策略与参数匹配，可显著提升系统抗扰动能力和动态响应性能，保障系统稳定运行，为电站运维提供理论支撑。

参考文献

- [1]周淼,王淑青,陈开元.基于CPL-PO算法的水轮机调节系统参数辨识[J/OL].水电能源科学,1-11[2026-01-25].<https://link.cnki.net/urlid/42.1231.tk.20260107.1621.028>.
- [2]邱豪.非线性水轮机调节系统的预设性能控制[J].水电站机电技术,2025,48(12):100-104.
- [3]卢盈宇,刘忠,安学利.水轮机调速器主配压阀运行特性分析[J].液压与气动,2025,49(11):19-28.
- [4]高峰,韩伟.响应频率扰动下水轮机调速稳定性自动模糊控制[J].微电机,2025,58(07):32-37.
- [5]陈金保,任刚,丁其琦,等.孤网模式下基于HBBC的水轮机调节系统稳定性量化分析方法研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(13):60-69.

作者简介：母冬（1995.10-），男，汉族，大学本科，籍贯：吉林松原，职称：助理工程师，研究方向：动力工程。