

水电厂调速系统在频率调节中的作用与优化建议

陈 超

华能澜沧江水电股份有限公司检修分公司 云南昆明 650051

摘 要：随着电力系统规模的不断扩大和对频率稳定性要求的日益提高，水电厂作为重要的调频电源，其调速系统的性能直接关系到电网的安全与稳定。然而，目前许多水电厂调速系统在运行中仍存在调节精度低、响应速度慢、抗干扰能力弱和自动化水平不高等问题。本文以水电厂调速系统为研究对象，系统分析了其结构组成与控制原理，深入探讨了调速系统在实际运行中的典型问题，并针对性地提出了优化建议与技术对策，包括控制参数优化、执行机构更新、智能化控制系统引入以及系统维护策略改进等。研究表明，提升调速系统的综合性能不仅有助于水电机组的安全运行，也对提高电网频率调节能力具有重要意义。本文的研究为水电厂调速系统的现代化升级提供了一定的理论参考和实践指导。

关键词：水电厂；调速系统；频率调节；系统优化；智能控制

引言

在现代电力系统中，频率的稳定性是保障电网安全运行和供电质量的关键。随着风能、光伏等可再生能源的大量接入，频率波动问题日益突出，调频任务变得更为复杂。水电作为传统而灵活的电源，在频率调节中具有不可替代的作用，尤其在电网频率大幅波动时，其调速系统可迅速响应，协助恢复系统稳定^{[1][2]}。

水电厂调速系统通过调节水轮机转速控制发电机输出功率，从而调节频率。然而，随着电力系统规模扩大和调频精度要求提升，传统调速系统在响应速度、调节精度等方面的不足逐渐显现，难以满足现代电网的需要^{[3][4][5][6]}。同时，如何实现水电与其他能源协同调频，也成为当前的研究重点。

尽管已有多种技术改进手段，但实际应用中仍面临响应滞后、控制精度低、智能化水平不足等问题。因此，研究如何提升调速系统综合性能，对提高电网频率调节能力具有重要意义。本文将系统分析水电厂调速系统的工作机制与存在的问题，提出面向数字化、智能化发展的优化建议，为其现代化升级提供理论与实践参考。

一、水电厂调速系统的基本原理与构成

水电厂调速系统是电力系统中的重要组成部分，主要作用是通过调节水轮发电机组的转速，从而控制发电功率，进而调节电网频率，保持电力系统的稳定性^[7]。

（一）调速系统的基本原理

水电厂调速系统的基本原理是通过改变水轮机的转速来调节发电机的输出功率，进而调节电网的频率。电网频率是由发电机的转速控制的，频率的升高通常意味着发电机转速加快，频率下降则意味着转速减慢^{[8][9]}。调速系统根据电网频率的波动，实时对水轮机进行调节。具体来说，当电网频率偏低时，调速系统会增加水轮机的转速，输出更多的电力；反之，当频率偏高时，调速系统则降低水轮机的转速，减少功率输出。通过这种方式，调速系统能够有效地平衡发电机组的输出功率与电网负荷需求，实现频率的精确调节。

（二）调速系统的主要构成

1. 主调速器

主调速器是调速系统的核心部件，负责接收来自电网频率变化的信号，并根据设定的控制策略输出调节指令。调速器的输出信号控制着液压伺服系统的动作，从而调整水轮机的转速。

2. 液压伺服系统

液压伺服系统用于将主调速器输出的电信号转化为机械动作，驱动水轮机的调速机构。液压伺服系统通过液压油的流动来控制水轮机的调速机构，从而精确调整水轮机的转速。

3. 控制逻辑单元

控制逻辑单元负责协调调速系统各个部件的协同工作，并通过输入信号对系统的运行状态进行监控与调整。

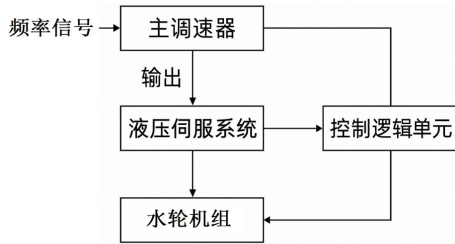


图2-1 调速系统的主要构成

(三) 调速系统的工作机制

1. 频率检测与信号处理

系统实时监测电网频率变化，若出现偏离，频率检测装置会将信号传送至主调速器，调速器根据控制算法计算出偏差值并生成调节指令。

2. 调速指令生成与传输

主调速器依据偏差大小生成调节命令，并通过液压伺服系统传输至水轮机。调速器的响应速度和控制精度直接影响频率调节效果。

3. 转速调整

液压伺服装置根据调速指令驱动导叶开度变化，从而控制水流量，实现对水轮机转速的动态调节。频率低则增大水流提升出力，频率高则减少水流降低出力。

4. 反馈与精度控制

系统具备反馈机制，实时评估调节效果并自动微调。采用如PID或模糊控制等智能算法，可进一步提升响应速度和调节精度，保障频率的稳定性与可靠性。

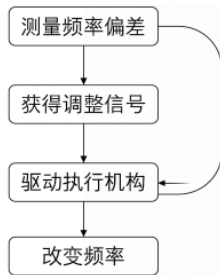


图2-2 调速系统频率响应的工作流程图

二、水电厂调速系统在频率调节中的作用

电力系统频率的稳定是保障供电质量与电力系统安全运行的重要指标。在实际运行中，系统频率常因电力负荷波动、机组运行变化及可再生能源接入等因素而产生偏移。

(一) 一次调频响应：惯性支持与自动调节

一次调频（Primary Frequency Control）是调速系统对电网频率偏移的初始响应，具有快速性和自动性的特点。当系统频率发生瞬时偏移时，水轮发电机组的转速传感

器即刻检测到频率变化，通过调速系统迅速调节导叶开度，改变水流量，从而改变发电功率，协助电网恢复频率平衡。水电机组在一次调频中的作用主要依靠其天然的机械惯性和调速器设定的频率-功率变化曲线。在频率偏低时，调速系统会增加水流量，提高出力；频率偏高时，则减少水流量以降低功率输出。

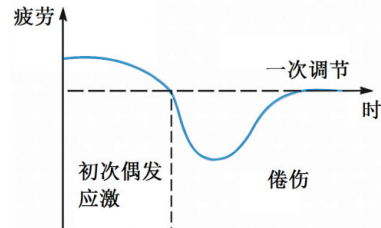


图3-1 水电厂调速系统一次调频响应示意图

(二) 二次调频响应：自动发电控制（AGC）参与系统调节

在完成一次调频后的几分钟内，为使系统频率恢复至额定值并释放调速器预留的调频容量，需启动二次调频机制。AGC系统通过控制中心发送功率指令，对接入系统的调速机组进行有序调节，进一步稳定频率并实现发电计划的精确执行。水电厂因其调节速度快、输出线性好、启停灵活，被广泛部署为AGC主力资源。尤其在新能源占比较高的区域，水电机组通过AGC频繁响应电网功率调度指令，平衡新能源波动带来的频率扰动，是构建柔性电网的核心支撑。在实际运行中，AGC指令通常以4~6秒的周期发送，水电调速系统需根据指令快速调整导叶开度和出力。

(三) 多机组协调调频：提升系统整体稳定性

现代大型水电站通常由多个机组组成，具备联动运行的能力。在频率调节任务中，调速系统不仅需完成单机响应，还需实现机组之间的协调控制。在分布式控制逻辑下，多机组调速系统根据频率偏差程度和各机组运行工况，自动协调功率输出。例如，处于低负荷运行状态的机组可以优先参与调频，以减轻主力机组负担；而运行在高效率区间的机组则维持出力，保障整体能效。通过通信网络与调度中心的实时联动，多机组调频控制可与区域AGC系统无缝衔接，实现电站内部与电网层级的协调控制，提高系统频率稳定性的同时，也提升了水电站运行经济性。

三、水电厂调速系统存在的主要问题

随着电力系统智能化和调频要求的不断提升，水电厂作为重要的调频资源，其调速系统性能显得尤为关键。

然而，目前许多水电厂仍存在调速系统技术滞后、响应不及时、精度不高等问题，直接影响了其参与电网频率调节的效率和稳定性。

（一）调节精度不足

部分水电厂使用的调速器仍为传统的机械液压式，其响应主要依赖于液压结构的机械运动，存在精度低、滞后性强的问题。在电网频率偏离设定值时，调速器对偏差信号的反应不够灵敏，容易出现“反应过度”或“反应不足”的现象。长期以往，会导致频率调节误差累积，不利于电网频率稳定。

（二）动态响应滞后

水轮机调速系统的一个重要性能指标是响应速度。在一次调频过程中，调速器需要快速判断频率偏差并及时调整导叶开度以平衡功率输出。然而，在实际运行中，调节指令的传输与执行存在一定延迟，尤其是液压管路长、信号处理慢的老旧系统，响应滞后现象更加明显，极易造成频率波动放大。

（三）缺乏智能化控制手段

许多水电厂调速系统仍以模拟信号和手动控制为主，系统本身缺乏数据采集、运行状态监测、参数自适应调整等智能化功能^[10]。这不仅增加了运行人员的操作负担，也使得系统在复杂工况下难以及时、准确地做出优化调整。没有远程监控和故障预警功能，也限制了水电厂与电网调度中心的高效协同^[11]。

（四）抗干扰能力弱

调速器在运行过程中需采集频率、电压、导叶开度等多路信号。如果系统电磁兼容性设计不足，容易受到周围高压设备、电机启动、无线信号等干扰源的影响，导致控制信号失真或误动作，严重时甚至可能造成系统跳闸或频率调节失控^[12]。

（五）设备老化与维护困难

部分水电厂调速系统运行时间较长，硬件老化、管路渗漏、传感器失准等问题时有发生。与此同时，调速系统的部分元器件已经停产或采购周期长，维护成本高、维修周期长，严重影响调节系统的连续性与可靠性。

四、水电厂调速系统优化的建议与对策

（一）提高调节精度，优化调速参数整定

加强调速器控制参数的优化整定，采用数字式调速器替代传统机械液压系统，并结合机组特性对比例（P）、积分（I）、微分（D）等参数进行系统性优化，使其更好地匹配机组动态响应特性^{[13][14][15]}。此外，引入自适应控

制算法，可在机组运行过程中自动识别系统状态并实时调整控制参数，进一步提高调节精度和稳定性。

（二）加快系统响应速度，提升一次调频能力

控制逻辑上可采用快速频率检测技术，缩短频率偏差识别时间；执行机构上建议采用响应速度更快的电液伺服系统或PWM控制的电动调节装置，降低系统惯性，提升响应速度^[16]。必要时，可通过引入二次调频辅助模块，减轻一次调节的负担。

（三）推进调速系统数字化与智能化升级

推动传统调速器向数字化控制平台转型，引入PLC、DCS系统等先进控制器，并结合SCADA系统实现远程监控与数据可视化。同时，集成运行状态监测、历史数据记录、智能分析等功能，有助于实现调速系统运行趋势分析、异常诊断与故障预警，提升整体调节质量与运行管理效率^[17]。

（四）增强系统抗干扰设计，提升运行稳定性

优化控制系统的电磁兼容设计，包括信号线路屏蔽、滤波器配置、合理接地等措施；同时加强对模拟量输入信号的防干扰处理，提升信号采集的稳定性与准确性^[18]。系统控制核心应具备容错机制，在信号异常时具备自保护功能，避免因误触发造成设备损坏或频率异常。

（五）强化维护管理与设备更新

建立定期检修与状态监测机制，对调速器执行机构、液压系统、传感器等关键部位定期维护和更新。鼓励逐步淘汰老旧机械式调速器，选用性能更稳定、易于管理的新型数字调速设备。同时建立调速系统备件库存管理机制，缩短故障抢修时间，提高设备可用率。

五、结论与展望

本文系统分析了水电厂调速系统的结构组成、运行问题与优化方向。研究发现，传统调速系统在精度、响应速度、抗干扰能力和智能化水平等方面存在明显不足，难以满足现代电网的调频需求。因此，提升控制精度与系统响应能力，需从参数优化、硬件更新和智能控制等方面同步推进，以增强系统综合调频性能。

面对电网规模扩大与新能源渗透加深的趋势，水电调速系统作为调频主力，其性能直接关系到电网运行的安全性和稳定性。未来调速系统应具备高精度、快响应、远程监控与自适应调节等智能功能，实现由“被动调节”向“主动控制”的转变。

随着控制技术、人工智能和通信手段的发展，水电调速系统将朝着智能化、集成化和网络化方向演进。实

时数据分析、预测性控制与电网调度的深度协同将成为系统升级的关键支撑,为构建更灵活、高效的电力系统提供有力保障。

参考文献

- [1]Wang, P., Jiang, Z., Xu, Y., Zhao, Z., & Zhu, F. (2025). Medium to long-term optimization model and scheduling strategy for cascade hydropower plants under high penetration of variable renewable energy. *Renewable Energy*, 214, 1201–1216.
- [2]Feng, C., Sun, N., Zheng, C., Zhu, Y., & Zhang, N. (2025). Stability analysis of grid-connected hydropower plant considering turbine nonlinearity and parameter-varying penstock model. *Scientific Reports*, 15, 8743.
- [3]谢允顶.水电厂调速系统技术改造[J].福建水力发电, 2022(5): 62.
- [4]李胜鑫, 黄彦锋.华安水电厂二厂机组甩负荷接器器停顿现象分析与处理[J].水电站机电技术, 2023(10): 32.
- [5]Mehadi, A. A., Khurram, N. A., Shagor, M. R. K., & Sarder, M. A. I. (2025). Optimized seasonal performance analysis and integrated operation of 50MW floating solar photovoltaic system with Kaptai hydroelectric power plant: A case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 47(6), 800–814.
- [6]Irshad, A. S., Amin, A. S., Ilham, A. M., Elkholy, M. H., & Elias, S. (2025). Power capacity enhancement of hydropower plant through the penetration of solar and wind energy. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 162, 108234.
- [7]寇林, 马晨原, 刘诚威, 等.中国水电新技术现状及前景展望[J].电站系统工程, 2022(9): 1150.
- [8]Zhang, L., Yang, J., Wang, J., Wang, L., & Niu, H. (2025). Optimizing Automatic Voltage Control Collaborative Responses in Chain-Structured Cascade Hydroelectric Power Plants Using Sensitivity Analysis. *Energies*, 18(10), 5201.
- [9]Shukla, H., & Kumar, S. (2025). Concurrent regulation of voltage and frequency of an isolated microgrid considering small hydro plant, DFIG and energy storage systems. *Renewable Energy*, 212, 1024–1036.
- [10]何才强.自动化控制技术在水电厂中的应用研究[J].科技与创新, 2023(3): 177.
- [11]Battisti, L., Tieghi, L., & Fattahi, S. (2025). Heat-loss based real-time monitoring method for hydroelectric power plant efficiency. *Energies*, 18(9), 4890.
- [12]史小杰.数字插装式水轮机调速器在密云水电厂的应用[J].水电站机电技术, 2023(3): 40.
- [13]潘熙和, 高雄, 方斌臣, 等.大型冲击式水轮机调速系统在云南高桥水电厂的应用[J].水利水电快报, 2022(6): 185.
- [14]王树新, 陈启明, 孟繁欣, 等.多机调速系统状态协同监测与优化控制[J].水利水电技术, 2021, 52(2): 158.
- [15]Zhao, Z., Deng, Z., Jin, X., Jia, Z., & Cao, R. (2025). Managing long-term operation of cascade hydropower plants under energy transition with physics-constrained LSTM networks. *Applied Energy*, 360, 121598.
- [16]淡洋, 杨明亮.组合阀在调速系统的应用与改进[J].水电与新能源, 2023(3): 51.
- [17]王永潭, 王振羽, 陈启明, 等.智能水电厂调速系统的设计与应用[J].水利水电技术, 2021, 52(2): 178.
- [18]杨晓波, 李娜, 张治宇, 等.保障水电厂安全运行的插装式组合阀研究[J].水电站机电技术, 2022(12): 31.