

# Research on the Coordinated Control Strategy and Device Improvement of Primary Frequency Regulation and AGC for Hydroelectric Generating Unit

Ziping Su

Wuling Electric Power Co., Ltd., Wanmipo Hydropower Plant, Changsha, Hunan, 410029, China

## Abstract

Against the backdrop of large-scale renewable energy integration and increasingly complex grid operation characteristics, maintaining power system stability and optimizing generation scheduling have become critical objectives for ensuring safe and efficient power system operations. Hydropower units, leveraging their technical advantages of rapid startup, flexible regulation, and swift response, simultaneously perform dual functions: Primary Frequency Modulation (PFM) and Automatic Generation Control (AGC). However, inherent differences in control objectives, response speed, and regulation priorities between these functions may lead to coordination conflicts if improperly managed. Such conflicts can result in frequent power fluctuations, degraded regulation quality, and even threaten grid security. Therefore, developing coordinated control strategies and improving related devices for hydropower units' PFM and AGC systems holds significant engineering value and academic importance for enhancing operational performance and ensuring grid stability.

## Keywords

hydroelectric generating unit; primary frequency regulation; automatic electric control; device improvement

# 水电机组一次调频与 AGC 协调控制策略及装置改进研究

苏紫萍

五凌电力有限公司碗米坡水电站, 中国·湖南长沙 410029

## 摘要

在新能源大规模并网、电网运行特性日趋复杂的背景下, 电网频率稳定与发电功率经济调度成为保障电力系统安全高效运行的核心目标。水电机组凭借启动迅速、调节灵活、响应快速的技术优势, 同时承担着一次调频 (Primary Frequency Modulation, PFM) 与自动发电控制 (Automatic Generation Control, AGC) 双重任务。然而, 两者在控制目标、响应速度与调节优先级上存在固有差异, 若协调不当易引发控制冲突, 导致机组功率波动频繁、调节品质下降, 甚至威胁电网安全。因此, 开展水电机组一次调频与 AGC 协调控制策略研究及装置改进, 对于提升机组调节性能、保障电网安全稳定运行具有重要的工程价值与学术意义。

## 关键词

水电机组; 一次调频; 自动电控制; 装置改进

## 1 引言

在“双碳”目标引领下, 光伏、风电等新能源大规模并网, 其出力的波动性与间歇性使电网频率稳定面临严峻挑战, 也对发电侧的调节能力提出了更高要求。水电机组凭借启动迅速、调节灵活、响应快速的技术优势, 成为电网频率应急支撑与经济调度的核心力量, 同时肩负着一次调频与 AGC 的双重职责。一次调频作为电网频率的“第一道防线”, 需在频率偏离额定值时瞬时响应, 通过调节导水叶等机构快速改变功率, 抑制频率波动; AGC 则作为电网经济运行的核心

手段, 需依据调度指令精准调节机组功率, 实现区域功率平衡与发电成本最优。两者的协同运行直接决定电网的安全稳定性与经济运行水平。

## 2 水电机组一次调频与 AGC 的作用机制及协调矛盾

### 2.1 核心作用机制解析

一次调频是指当电网频率偏离额定值 (我国为 50Hz) 时, 水电机组通过调节机构 (如导水叶) 自发改变发电功率, 使频率恢复至允许范围的控制过程。其核心原理基于机组转速与频率的耦合关系, 通过转速信号反馈触发调节指令, 调节速度通常以数百毫秒计, 调节幅度与频率偏差成正比 (遵循“调差系数”特性)。例如, 当电网频率降至 49.8Hz 时,

【作者简介】苏紫萍 (1998—), 女, 中国湖南益阳人, 本科, 助理工程师, 从事水力发电机组维护研究。

调差系数为4%的水电机组需额外增发20%的额定功率，以快速抑制频率跌落。

AGC 则是在调度中心的统一指令下，通过闭环控制调节机组发电功率，实现区域发电功率与负荷的动态平衡，并跟踪计划发电曲线。其控制逻辑以“经济负荷分配”为核心，综合考虑机组效率、能耗、水位约束等因素，调节速度相对平缓（通常以秒级计），调节精度要求达到 $\pm 0.1\%$ 额定功率。例如，某区域电网通过 AGC 系统将负荷指令分配至各水电站，使总发电量与区域用电负荷偏差控制在1%以内。

从控制层级来看，一次调频属于“本地紧急控制”，优先级高于 AGC；AGC 属于“远程经济调度”，需在干扰一次调频的前提下实现功率调节。两者的协同运行是保障电网“安全+经济”双重目标的关键<sup>[1]</sup>。

## 2.2 典型协调矛盾及成因

实际运行中，一次调频与 AGC 的协调矛盾主要体现在三个方面：一是“响应速度冲突”，一次调频的瞬时大功率调节易导致 AGC 功率偏差超标，触发 AGC 的反向调节，形成“功率振荡”。例如，某水电站在一次调频增发10%功率后，AGC 系统因检测到功率偏离计划值，立即发出减功率指令，导致机组功率在10秒内波动幅度达8%，影响供电稳定性。二是“调节目标冲突”，一次调频以“频率恢复”为唯一目标，可能突破 AGC 的经济负荷区间；AGC 的经济调度则可能削弱一次调频的调节能力，例如为降低能耗将机组维持在低效率区间，导致一次调频时调节裕量不足。三是“水锤效应叠加”，水电机组导水叶的快速调节（一次调频）易引发压力管道水锤效应，而 AGC 的频繁调节会加剧这一问题，导致管道压力波动超标，威胁机组安全。

矛盾成因主要包括三个层面：控制逻辑层面，传统控制策略未建立“优先级动态分配”机制，两者独立运行缺乏协同；硬件响应层面，老式调节装置的信号处理延迟达200ms以上，无法满足快速协调需求；参数适配层面，一次调频的调差系数、AGC 的 PID 参数未根据机组工况（如水头、负荷）动态优化，导致调节品质下降。

## 3 水电机组一次调频与 AGC 协调控制策略创新

针对上述矛盾，需从控制逻辑重构、工况自适应调节、智能算法融合三个维度构建创新协调控制策略，实现“紧急响应优先、经济调度跟进、动态协同优化”的控制目标。

### 3.1 基于优先级动态分配的分层协调策略

#### 3.1.1 紧急协调模式

当电网频率偏差  $\Delta f \geq \pm 0.2\text{Hz}$ （严重偏离）时，触发紧急模式，一次调频优先级设为最高，AGC 系统暂停主动调节，仅保留“功率超限保护”功能。此时，协调器通过“调频功率补偿”逻辑，将一次调频的调节量计入 AGC 功率偏差，避免 AGC 在频率恢复后出现反向冲击。例如，某机组一次调频增发12%功率后，协调器将 AGC 计划功率临时上调12%，待频率恢复至 $\pm 0.05\text{Hz}$ 以内后，再通过“平滑过渡算法”将功率缓慢回调至原计划值，回调速率控制在0.5%

额定功率/秒，避免功率突变。

#### 3.1.2 常态协调模式

当频率偏差  $\Delta f < \pm 0.2\text{Hz}$ （轻微波动）时，启动常态模式，一次调频与 AGC 协同调节。协调器通过“权重分配公式”计算两者的调节比例： $P_{\text{总调节}} = k_1 \times P_{\text{调频需求}} + k_2 \times P_{\text{AGC需求}}$ ，其中  $k_1$ （调频权重）随  $\Delta f$  增大而增大， $k_2$ （AGC 权重）随  $\Delta f$  减小而增大。例如，当  $\Delta f = 0.1\text{Hz}$ 、AGC 功率偏差 = 5% 时， $k_1 = 0.6$ 、 $k_2 = 0.4$ ，机组总调节量为60%调频需求 + 40%AGC 需求，既保障频率稳定，又逐步逼近经济负荷<sup>[2]</sup>。

#### 3.1.3 停机/检修模式

当机组处于检修状态或 AGC 指令中断时，协调器自动屏蔽 AGC 控制，仅保留一次调频功能，确保电网频率紧急时的响应能力。

## 3.2 考虑水电机组特性的工况自适应调节策略

### 3.2.1 水头自适应调节

通过压力传感器实时采集上游水头，建立“水头-调差系数”映射模型。高水头工况下（水头 > 设计水头10%），机组调节灵敏度升高，调差系数自动从4%上调至5%，避免一次调频超调；低水头工况下（水头 < 设计水头10%），调差系数降至3%，提升调频响应力度。

### 3.2.2 水锤效应抑制策略

在一次调频与 AGC 调节指令叠加时，引入“前馈补偿+分段调节”逻辑。当导水叶调节幅度 > 5% 额定开度时，先以20%的速率快速开启/关闭导水叶至目标开度的80%，再以5%的速率缓慢调节至目标值，同时通过压力管道压力反馈实时修正调节速率。

### 3.2.3 负荷区间自适应优化

将机组负荷划分为“低负荷区（< 30% 额定功率）、额定负荷区（30%-80%）、高负荷区（> 80%）”，不同区间采用差异化协调逻辑。低负荷区优先保障一次调频调节裕量，AGC 调节速率降至0.3%/秒；高负荷区限制一次调频最大调节幅度（ $\leq 8\%$  额定功率），避免机组过载；额定负荷区则兼顾调节速度与经济性，实现最优协同。

## 3.3 基于智能算法的协调控制优化

引入模糊 PID、模型预测控制（MPC）等智能算法，解决传统控制中参数整定困难、抗干扰能力弱的问题：

### 3.3.1 模糊 PID 协调控制

将一次调频的频率偏差、AGC 的功率偏差及两者的变化率作为模糊控制器的输入，动态调整 PID 参数（比例系数  $K_p$ 、积分系数  $K_i$ 、微分系数  $K_d$ ）。当频率与功率偏差均较大时，增大  $K_p$ 、减小  $K_i$ ，提升响应速度；当偏差趋近于零时，减小  $K_p$ 、增大  $K_i$ ，消除静态误差。某机组应用模糊 PID 后，一次调频频率恢复时间从5秒缩短至3秒，AGC 功率跟踪误差从 $\pm 0.5\%$ 降至 $\pm 0.15\%$ 。

### 3.3.2 模型预测协调控制

建立水电机组“调节机构-水轮机-发电机-电网”的多变量预测模型，预测未来5秒内的频率变化与功率变化

趋势。协调器根据预测结果提前分配调节指令，例如预测到1秒后频率将跌落0.1Hz，提前触发一次调频预调节，使机组在频率实际跌落前完成50%的调节量，显著提升响应及时性。

### 3.3.3 大数据驱动的参数自学习

通过工业互联网平台采集机组历史运行数据（涵盖不同水头、负荷、电网工况），利用神经网络算法训练“工况-最优参数”模型，实现协调控制参数的在线自学习与自优化。例如，通过学习历史数据发现，在水头120m、负荷60%工况下， $K_p=2.5$ 、 $K_i=0.3$ 、 $K_d=0.8$ 时调节品质最优，模型可自动将该参数组合应用于同类工况<sup>[9]</sup>。

## 4 水电机组协调控制装置改进方向及关键技术

### 4.1 硬件核心组件升级

#### 4.1.1 高性能控制器选型

采用多核工业级CPU（如Intel Core i7-12700E）作为主控单元，主频提升至2.7GHz，数据处理能力较传统单核CPU提升5倍，可同时并行处理一次调频、AGC、水锤抑制等多任务，指令响应延迟控制在50ms以内。

#### 4.1.2 高精度信号采集模块

升级转速、功率、水头传感器，采用16位AD转换器，转速测量精度从 $\pm 1r/min$ 提升至 $\pm 0.1r/min$ ，功率测量精度从 $\pm 0.5\%$ 提升至 $\pm 0.1\%$ 。同时增加信号滤波电路，通过卡尔曼滤波算法消除电网谐波与电磁干扰对信号的影响，确保频率与功率信号的稳定性。

#### 4.1.3 高速通信模块配置

采用“5G+工业以太网”双通信链路，5G链路用于传输AGC调度指令，通信延迟 $\leq 10ms$ ；工业以太网用于机组内部信号交互，传输速率达1000Mbps。双链路冗余设计确保通信中断时自动切换，切换时间 $< 100ms$ ，避免因通信故障导致控制失效。

#### 4.1.4 安全冗余设计

增加备用控制器与电源模块，采用“主-备”热备模式，当主控制器故障时，备用控制器在200ms内接管控制任务，电源模块支持双回路供电，确保装置在电网电压波动 $\pm 20\%$ 时仍能稳定运行。

### 4.2 软件系统优化与功能扩展

#### 4.2.1 模块化软件架构重构

采用“实时操作系统（RTOS）+应用程序”架构，将控制逻辑拆分为“一次调频模块、AGC模块、协调决策模块、故障诊断模块”等独立模块，模块间通过标准化接口通信，便于功能升级与维护。例如，新增新能源协同调节功能时，仅需开发独立模块接入系统，无需修改核心控制逻辑。

#### 4.2.2 人机交互界面（HMI）升级

设计可视化监控界面，实时显示频率曲线、功率曲线、调节指令等关键参数，支持历史数据查询（近1年数据）与故障追溯。新增“参数配置向导”功能，操作人员可根据机

组型号与工况，通过向导快速完成调差系数、PID参数等关键参数的配置，降低操作难度。

### 4.2.3 故障诊断与自恢复功能

集成故障诊断算法，实时监控控制器、传感器、通信模块的运行状态，当检测到传感器故障时，自动切换至备用传感器；当发现控制参数异常时，调用历史最优参数临时替代，并发出报警信号。

### 4.2.4 边缘计算能力集成

在装置中嵌入边缘计算模块，实现实时数据的本地分析与处理，例如通过边缘计算实时识别电网频率波动特征，提前判断一次调频触发时机，避免误触发。同时，边缘计算模块可过滤无效数据，仅将关键运行数据上传至云端平台，降低数据传输压力。

### 4.3 接口标准化与互联互通

#### 4.3.1 通信协议标准化

采用IEC 61850标准通信协议，实现协调控制装置与AGC调度中心、机组监控系统（SCADA）、状态监测系统的无缝对接，解决传统装置“协议不兼容、数据孤岛”问题。例如，通过IEC 61850-9-2协议实现功率、频率数据的标准化传输，确保不同厂家设备间的互联互通。

#### 4.3.2 控制接口灵活适配

设计可配置的模拟量与数字量接口，支持不同型号水轮机调节机构（如转桨式、混流式）的控制需求。接口输出信号范围可通过软件配置（0-5V/4-20mA），无需更换硬件即可适配不同厂家的执行机构。

#### 4.3.3 数据共享平台构建

通过接口将协调控制装置的运行数据上传至水电站智慧运维平台，实现“控制-监测-运维”数据一体化管理。运维人员可通过平台远程监控机组协调控制状态，进行参数远程配置与故障远程诊断，提升运维效率。

## 5 结语

水电机组一次调频与AGC的协调控制是保障电网安全经济运行的核心技术之一。本文提出的“优先级动态分配分层协调策略”“工况自适应调节策略”及“智能算法优化策略”，有效解决了两者的响应速度冲突与目标冲突问题；通过硬件核心组件升级、软件系统优化及接口标准化，提升了协调控制装置的可靠性与调节性能。随着技术的不断创新，水电机组在电网中的调节作用将更加凸显，为构建新型电力系统提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1] 徐兴友,刘平,郑艳梅,等. “两个细则”下水轮机调速器控制模式特性探讨[J].水电能源科学,2025,43(10):192-195.
- [2] 张浩,张田,李琛玺,等. 基于模糊分频控制的飞轮储能辅助水电机组一次调频控制研究[J].水利学报,2025,56(10):1326-1337.
- [3] 黄怡涵,王小海,张红光,等. 火电机组一次调频简化模型改进与电力系统频率安全约束解析计算[J].电力系统保护与控制,2025,53(15):36-47.