

水电站电力监控系统 PID 参数优化对负荷调节动态特性的影响研究

熊国恩 郑德芳^(通讯作者) 李赛^(通讯作者) 崔峻豪 李鹏熙

雅砻江（四川）新能源有限公司，四川成都，610051；

摘要：本文以省内某大型水电站为研究对象，系统阐述其电力监控系统 PID（比例/积分/微分闭环控制算法）调节参数的设置及其负荷调节运行现状，基于此通过对 PID 参数进行优化，以达到满足调度控制中心要求的负荷调节速率，并进一步聚焦机组在运行过程中新产生的振动、摆度数值升高问题再次进行监控系统 PID 参数创新优化，不断提升机组运行的安全性和稳定性。实践表明，经优化后的监控系统 PID 参数，不仅使机组负荷调节呈现显著向好态势，同时改善机组的振动、摆度指标的稳定性，使负荷调节速率得到有效提升，为水电站创造了可观的经济效益。本研究成果可为电力生产领域的监控系统 PID 参数优化提供切实可行的解决方案与实践参考。

关键词：水电站电力监控系统；PID 参数优化；负荷调节；机组振动摆度；运行稳定性

DOI： 10. 69979/3060-8767. 26. 05. 004

引言

某大型水电站共装设 4 台单机容量 150MW 的轴流转桨式水轮发电机组，总装机容量 600MW，于 2016 年全面建成投产，是国家西部大开发战略的标志性工程之一。电站机组均已接入省级电力调度系统，其功能定位以发电为主，兼有下游综合用水需求，同时承担电网调峰、调频的重要任务。

该水电站计算机监控系统使用国电南瑞科技股份有限公司产品，机组在计算机监控系统向调速器发送负荷脉冲的开度调节模式下运行，监控系统 PID 算法控制环节主要集成在 MB80（控制器别称，无实际意义）系列智能可编程控制器的主控 CPU（Central Processing Unit，中央处理器）模块中，其负荷调节典型 PID 算法公式如下：

$$U(t) = KP \times e(t) + KI \times \sum_{j=0}^k e(t) + KD \times [e(t) - e(t-1)]$$

该水电站机组 LCU（Local Control Unit，机组现地控制单元）采用 MB80 系列 PLC（Programmable Controllers，可编程序控制器）构成，PLC 程序调用 MBPro（软件别称，无实际意义）软件的标准 PID 功能模块以实现负荷调节。负荷调节 PID 控制系统原理框图如图 1 所示。

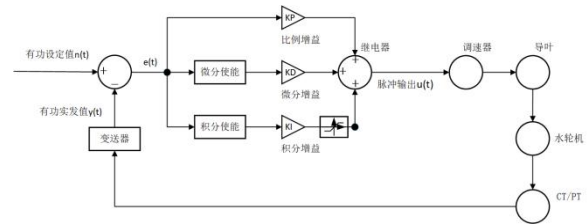


图 1 机组 PID 控制系统原理

PID 调节模块作为水电站计算机监控系统实现负荷精准控制的核心环节，其参数配置直接决定着机组负荷调节的动态响应特性与稳态控制精度。文献^[1]指出，在新能源大规模并网与电力市场机制改革的双重背景下，通过改进协同量子粒子群算法优化 PID 参数，能提升系统在通信时滞等复杂条件下的负荷调节稳定性，PID 参数优化已成为衔接机组安全运行与市场响应能力的关键技术支点。文献^[2]提出了一种创新的分段控制算法，该算法将时间最优控制与带死区的数字 PID 控制相融合，有效应对时变非线性负荷调节场景，实现了快速响应、稳定运行与优良控制特性的统一。文献^[3]进一步证实，PID 控制策略具有结构简单、可靠性强，参数物理意义明确、调节方便等优点，在工业控制过程中得到了广泛应用。但对于复杂的非线性系统，仅靠一组 PID 参数难以满足多工况的控制要求。目前，水机组的优化控制主要从 PID 控制策略优化和先进控制算法两个方面开展研究。若 PID 参数匹配不当，会导致负荷调节滞后、响应速度放缓，不仅难以满足电力现货市场对调节速率的要求，还可能引发电网频率波动，影响供电可靠

性。

随着省内电力现货市场交易模式的加快建设,水电站机组负荷的调节速度、调节精度、响应时间等指标面临更为严苛的要求。基于此,该水电站统筹兼顾机组运行的安全稳定性与负荷调节性能,根据机组负荷的调整方向及变幅大小,设置差异化的动态负荷调节PID参数,以达到更灵活、更适应负荷调节效果,实现机组在电力现货市场交易模式下的安全、经济、高效运行。

1 PID 参数初始配置与负荷调节分析

1.1 PID 参数初始配置方案

在监控系统PID调节模块中,负荷调节性能主要由比例系数KP、调节周期ST和最大脉宽MP三个参数决定。其中,KP主要用于调整控制系统的响应速度;调节周期ST为PID算法的执行周期,每一周期对测量量进行一次扫描并依据PID运算输出脉冲,其作用是控制指令输出周期,抑制系统超调,缩短ST有助于提升系统动态响应性能;最大脉宽MP为输出脉冲的宽度上限,当PID计算所得脉宽超过MP时,输出将限制为MP值,其主要功能是限制脉冲长度,保护调速器系统,同时增大MP也可提高系统的响应速度。该水电站4台机组原负荷调节PID参数设置如表1所示。

表1 PID 主要参数配置方案

参数名称	数值	单位	用途
KP	6	无	用于计算脉冲宽度
ST	6000	ms	用于设置脉冲等待周期
MP	1000	ms	用于设置最大脉冲宽度

监控系统采用的PID功能块在每个调节周期按如下公式计算输出开度脉冲宽度:

$$P_w = \frac{KP \times \text{abs}(P_Set - P_Current)}{P_Max - P_Min}$$

P_w: 脉冲宽度

P_{Set}: 机组有功功率设定值

P_{Current}: 机组有功功率实发值

P_{Max}: 当前水头下机组有功最大出力

P_{Min}: 当前水头下机组有功最小出力

根据公式可以看出,实际脉冲宽度跟调节比例系数KP、机组有功设定值与实发值的差值成正比,同时跟机组当前水头下有功最大出力与最小出力差值成反比。其中,机组有功设定值大于机组有功实发值时为正脉冲,反之为负脉冲;当脉冲宽度大于最大脉宽MP则输出最大脉宽。

1.2 负荷调节分析

为了适应省内电力现货市场交易模式,保障省内电网频率安全与联络线稳定控制,省调度控制中心提前部署,与各水电站开展联合试验。依据试验结果,督促各水电站对现存问题及时进行优化完善,并明确考核要求,对未在规定时间内完成整改的水电站实时严肃考核。其中,省调对水电站负荷调节速率要求为:1)标准速率,单机每分钟调节功率应大于30%P_n,即45MW/min(MW/min,即兆瓦每分钟),若4台机投入运行,则为180MW/min;2)最低速率,单机每分钟调节功率最低不能低于20%P_n,即30MW/min,若4台机投入运行,则为120MW/min。在上述PID参数初始配置方案下,该水电站于2025年2月完成和省调度控制中心的联合试验,试验期间3台机组投入运行,试验结果汇总如表2,试验表明该水电站3台机组负荷调节平均速率整体仅有36.49MW/min,无法满足调度最低要求(90MW/min),亟需提升。进一步深入分析机组有功功率分段调节情况,在小负荷梯度调整场景下,其响应时间和调节速率呈现显著的方向依赖性和幅值敏感性,不同有功功率调整方向与调整量对应的控制效果差异显著,且均未满足要求。在后续章节中会对小负荷调整情况进一步展示说明。

表2 负荷调节测试结果

有功设定值变化方向(MW)	有功变幅(MW)	调节用时(秒)	调节速率(MW/min)
150→447.1	297.1	581	30.68
150→439.3	289.3	576	30.14
450→150.0	300	370	48.65

2 静态PID参数寻优及负荷调节效果

2.1 静态PID参数寻优

为符合省调度控制中心对机组负荷调节指标的综合要求,该水电站通过分析PID参数,初步确定需优化KP和MP两个参数,并于2025年5月开展站内单机负荷调节试验,确认最终优化数值。部分PID参数优化过程试验数据如表3-7所示,以#1机组为例,初始机组有功实发值为60MW,调节速率计算公式为:调节速率=有功变幅/调节时间。出于考虑省调下发总有功后通道的延时时间以及监控系统对总有功设定值处理后再分配至各机组的时间,在试验中,将调节时间增加了10秒。

表 3 KP=9、MP=1000 时负荷调整试验

有功调整方向	有功变幅 (MW)	调节时间 (秒)	调节速率 (MW/min)
增	5	15	20.00
减	5	16	18.75
增	10	30	20.00
减	10	29	20.69
增	15	25	36.00
减	15	21	42.86
增	20	33	36.36
减	20	29	41.38
增	25	39	38.46
减	25	40	37.50

表 4 KP=10、MP=1000 时负荷调整试验

有功调整方向	有功变幅 (MW)	调节时间 (秒)	调节速率 (MW/min)
增	5	15	20.00
减	5	16	18.75
增	10	24	25.00
减	10	20	30.00
增	15	25	36.00
减	15	21	42.86
增	20	33	36.36
减	20	29	41.38
增	25	39	38.46
减	25	40	37.50

表 5 KP=11、MP=1000 时负荷调整试验

有功调整方向	有功变幅 (MW)	调节时间 (秒)	调节速率 (MW/min)
增	5	15	20.00
减	5	16	18.75
增	10	30	20.00
减	10	23	26.09
增	15	25	36.00
减	15	21	42.86
增	20	34	35.29
减	20	34	35.29
增	25	39	38.46
减	25	40	37.50

表 6 KP=11、MP=1500 时负荷调整试验

有功调整方向	有功变幅 (MW)	调节时间 (秒)	调节速率 (MW/min)
增	5	24	12.50
减	5	21	14.29
增	10	25	24.00
减	10	24	25.00
增	15	25	36.00
减	15	25	36.00

增	20	38	31.58
减	20	34	35.29
增	25	36	41.67
减	25	43	34.88

表 7 KP=12、MP=1500 时负荷调整试验

有功调整方向	有功变幅 (MW)	调节时间 (秒)	调节速率 (MW/min)
增	5	24	12.50
减	5	21	14.29
增	10	29	20.69
减	10	20	30.00
增	15	25	36.00
减	15	25	36.00
增	20	32	37.50
减	20	29	41.38
增	25	36	41.67
减	25	43	34.88

通过对 4 台机组开展负荷调节试验，在试验中均出现由于不断增加 KP 和 MP 数值，导致机组振动和摆度数值也不断增加，甚至到达高报警限值，因此停止试验，汇报省调度控制中心并经同意后，最终将 PID 参数修改为 KP=12、MP=1500、ST=6000。

同时，为进一步缩短负荷调节响应时间、提高负荷调节精度，该水电站开展了如下优化工作：1) 优化全厂总有功实发值计算方式。通过部署新的程序代替原程序计算脚本，提高运算效率，提升“全厂总有功实发值”上送调度数据的实时性。2) 自动发电控制系统程序升级。该水电站采取成组控制的调节模式，因此通过优化发电控制核心算法，提高发电控制命令的处理效率，缩短数据源读取周期，优化分配策略，从而提高负荷调节的精度和速率^[4]。3) 升级与省调的通讯程序。依据《DL/T 2565 基于 IEC 60870-5-104 的水电网络通信协议扩充导则》要求^[5]，升级现有通讯程序，提高调度设值命令处理效率，缩短通讯程序关于变化遥测的检测上送周期，提高上送调度数据的实时性。4) 优化小负荷分配功能。优化调整小负荷门槛值，减少小负荷多机组分配情况出现，进一步提升负荷调节速率^[6]。

2.2 负荷调节效果

机组 PID 参数优化后，根据机组运行实际情况开展了单机负荷调节速率测试试验。经数据分析，各机组调节速率较优化前均有大幅提升：其中#1 机组平均调节速率由 30.52MW/min 升至 56.25MW/min；#2 机组平均调节速率由 39.36MW/min 升至 58.97MW/min；#3 机组平

均调节速率由 35.38MW/min 升至 59.86MW/min; #4 机组平均调节速率由 23.69MW/min 升至 68.81MW/min。

通过对全厂负荷调节数据进行分析,该水电站负荷整体调节速率在 PID 参数优化后,从原有的 31.25MW/min 提升至 115.38MW/min,较优化前得到大幅提升,基本达到省调度控制中心的最低要求,由于各机组振动摆度加剧,为确保机组安全稳定运行,未再进一步优化 PID 参数。全厂负荷调节性能优化前后调节速率对比情况如图 2 所示。

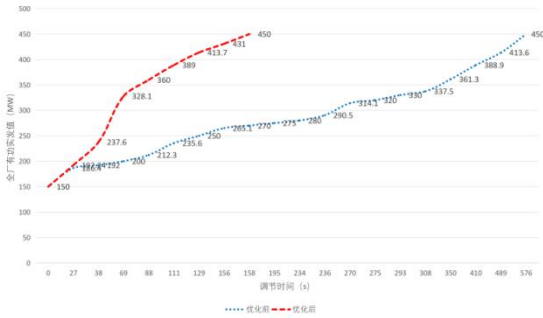


图 2 全厂 AGC 调节性能优化前后调节速率对比

3 动态 PID 参数配置及负荷调节特性

3.1 动态 PID 参数配置

3.1.1 动态 PID 参数配置必要性

静态 PID 参数寻优工作完成后,各机组在实际运行期间振摆幅值出现一定程度上升,并偶发越高限报警,且越高限报警多集中在负荷剧烈调整时段,属于预期范畴。与此同时,电力现货市场环境下的新型电力系统,特别是其中的调频模式,对水电机组的调峰、调频能力提出前所未有的高要求^[7],该水电站原设计工况以承担基荷或峰荷运行为主,而随着区域新能源的快速发展,机组实际运行工况较原有设计发生了巨大变化,机组负荷调节频次和幅度较以往显著增加,且单次多为 7MW-10MW 小负荷调节量。为避免机组机械设备损伤,亟需研发差异化负荷调节功能,构建动态 PID 参数配置方案,合理放缓机组负荷调节速率,以适配机组的实际运行需求。

3.1.2 动态 PID 参数配置方案

结合引言中文献^{[1]、[2]、[3]}及文献^{[8]、[9]}的研究结论可知,PID 参数动态配置具备多元搭配模式,可依据机组的不同负荷区间、有功功率调整方向、运行水头以及有功功率设定值与实发值的偏差量等,针对性设定多套差异化 PID 调节参数,并构建与之适配的控制算法。

该水电站通过深度挖掘机组历史运行数据,制定了 PID 动态参数配置方案。根据有功设定值与实发值差值大小及有功变幅趋势划分有功小变幅上升、有功小变幅下降、有功大变幅上升及有功大变幅下降四种工况,并匹配差异化 PID 比例系数参数,以此优化调节过程的平稳性与响应速度,该方法通过辨识不同工况下的对象特性,实现了控制参数的在线自适应匹配。方案初始配置如表 8 所示,以#2 机组为例,并基于此开展单机负荷调节试验以校准和确定最终参数数值,分段调节参数设定逻辑框图如图 3 所示。

表 8 初始动态 PID 参数配置方案

有功设定值与实发值差	有功变幅方向	KP
小于 10MW	增负荷	6
小于 10MW	降负荷	6
大于 10MW	增负荷	6
大于 10MW	降负荷	6

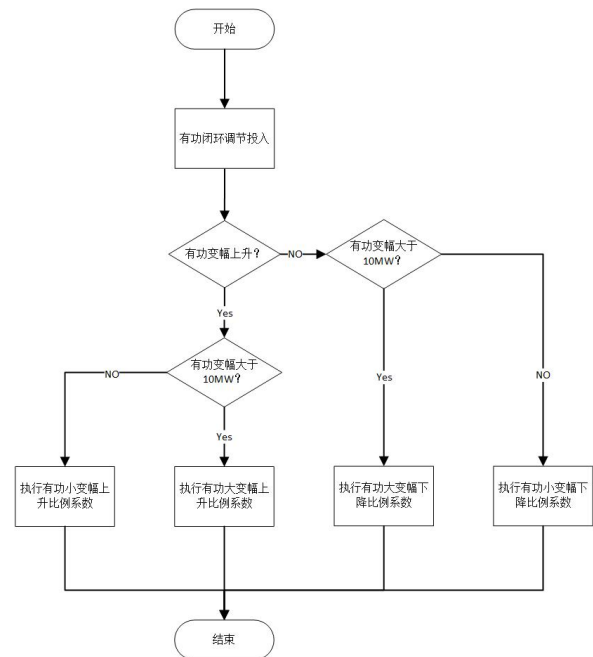


图 3 #2 机组分段 KP 调节参数设定逻辑框图

3.2 负荷调节试验及其特性

负荷调节试验依托该水电站 2025 年 12 月#2 机组检修后的并网试验同步开展,试验期间固定调速器一次调频频率死区参数、一次调频浆叶死区参数及并网模式浆叶死区参数等,以此规避调速器参数波动对负荷调节速率的干扰。试验设置比例系数 KP 取值区间为 5-9,有功功率单次变幅依次选取 3-10MW、15MW、20MW、25MW、30MW,针对不同组合分别开展负荷调节时间与调节速率的专项测试。对比试验结果表明,有功变幅

10MW 以内负荷调节速率较慢，有功变幅 10MW 以上时负荷调节速率相对较快，因此将 10MW 作为有功变幅的分界具备合理性，如图 4 所示。

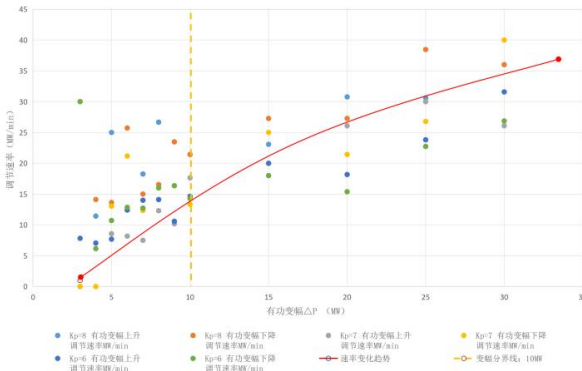


图 4 #2 机组负荷调节速率分区对比散点图

经过对试验结果整理，最终机组动态 PID 参数配置方案如表 9 所示，以此基本满足调度最低要求，并实现在不同负荷变化情况下对机组调节速率的精准控制。

表 9 最终动态 PID 参数配置方案

有功设定值与实发值差 (MW)	有功变化方向	KP	平均调节速率 (MW/min)
小于 10	增负荷	9	19.00
小于 10	降负荷	9	21.47
大于 10	增负荷	8	28.37
大于 10	增负荷	8	30.08

经分析#2 机组 PID 参数优化前后运行数据，得出结论：1) PID 参数优化后，机组整体调节速率合理放缓的同时，有效削弱了不同调节方向与变幅下的速率差异，显著提升了负荷响应的平稳性与一致性，机组调节速率对比情况如图 5 所示。2) PID 参数优化后，机组运行的整体情况较此前更加平稳，机组振动、摆度数值稳定，越高限告警次数显著降低，机组运行稳定性呈现良好趋势，机组各振摆数据对比情况如图 6-10 所示（单位：um，即微米）。同时，由于其他机组暂时未开展检修，待后续对其他机组 PID 参数进行动态配置。

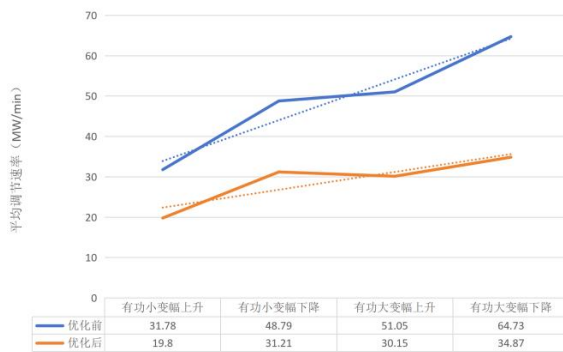


图 5 #2 机组负荷调节平均速率对比图

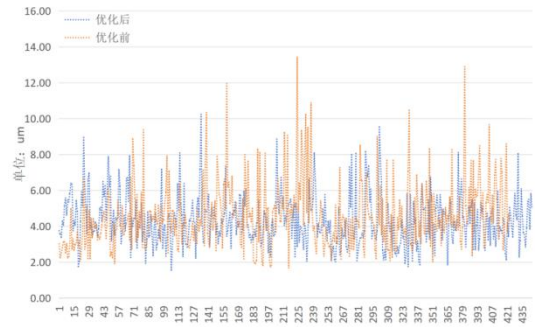


图 6 #2 机组顶盖 Z 向垂直振动 (单次调节期间最大值)

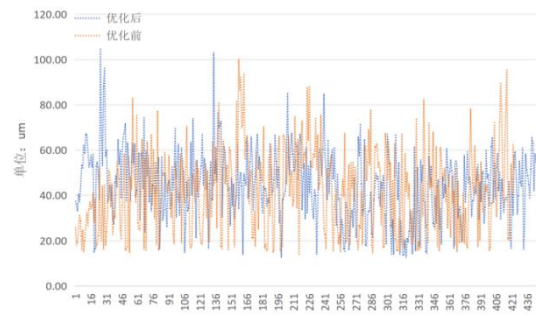


图 7 #2 机组下机架 Z 向垂直振动 (单次调节期间最大值)

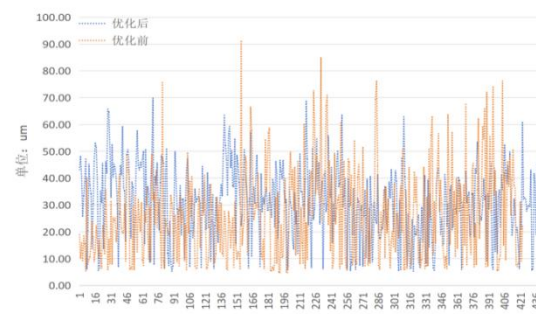


图 8 #2 机组上架架 Z 向垂直振动 (单次调节期间最大值)

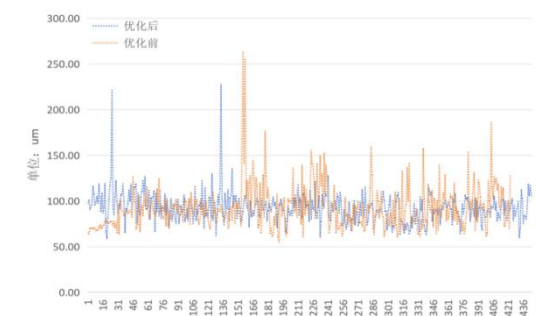


图 9 #2 机组水导轴承摆度 (单次调节期间最大值)

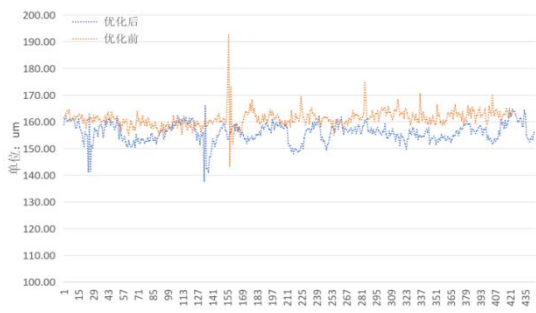


图 10 #2 机组上导轴承摆度 (单次调节期间最大值)

3.3 下一步计划

经统计#2 机组 PID 参数优化后, 2025 年 12 月至 2026 年 1 月共计 41 天#2 机组实际运行数据, 机组负荷调节共计 1998 次, 机组有功小变幅下降平均速率、有功大变幅上升平均速率、有功大变幅下降平均速率已达到调度要求的最低负荷调节速率, 仅有有功小变幅上升平均速率在 21MW/min, 暂不满足要求, 如图 11 所示。后续计划在满足机组振动摆度数值稳定的情况下, 并结合试验结果, 将有功小变幅上升 KP 参数值增大, 以实现机组运行受益最大化。

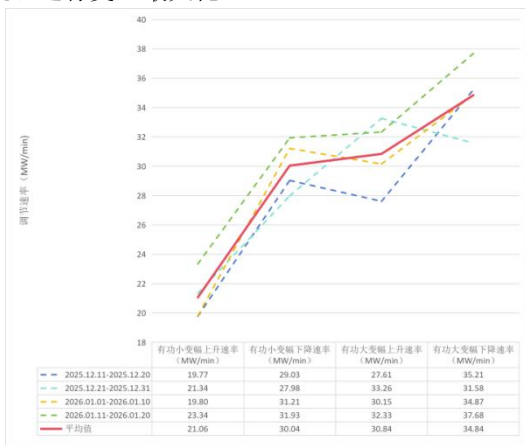


图 11 #2 机组负荷调节平均速率对比

4 结语

本文围绕某大型轴流转桨式水电站在电力现货市场环境下的负荷调节性能提升需求, 开展了 PID 参数初始配置分析、静态参数寻优及动态参数配置的系统性研究, 得出以下结论: 1) 初始 PID 参数配置下, 机组负荷调节速率未达省调要求, 小负荷调整特性存在方向与幅值敏感性, 难以适配市场需求。2) 静态 PID 参数寻优及配套措施大幅提升调节速率, 基本满足省调要求, 但引发机组振动摆度上升问题, 加剧机组机械设备损伤, 凸显固定参数控制的局限性。3) 差异化动态 PID 参数配置方案, 可兼顾调节速率与机组稳定性, 机组的实际运行数据证实该方案有效解决了机械设备振动摆度超标问题, 实现安全与性能协同提升。

后续研究可进一步结合水电站水头变化特性与电力现货市场环境下机组功率预测数据, 构建多因素耦合

的动态 PID 参数自整定模型^[10], 同时扩大动态参数配置的机组试验范围, 形成更多可复制、可推广的水电厂负荷调节控制优化方案, 为水电站高渗透率下电力系统的安全稳定运行提供技术支撑。

参考文献

- [1] 方仍存, 桑子夏, 刘知行, 等. 基于改进协同量子粒子群算法的多微网负荷频率控制[J]. 电力建设, 2023, 44(7): 87-97.
- [2] 殷召生. 时间最优 PID 控制算法在水电厂监控系统功率调节中的应用[J]. 无线互联科技, 2022, 19(05): 108-110.
- [3] 黄金龙, 秦小元, 沈博渊, 夏晨, 陈金保, 肖志怀. 基于神经网络和智能优化算法的水电机组自适应 PID 控制[J]. 中国农村水利水电, 2022(09): 195-200+208.
- [4] 黄海军, 王秋晨, 刘照友. 论 AGC 功能在大型水电机组中应用的优化策略[J]. 云南水力发电, 2018, 34(03): 119-123.
- [5] 国家能源局. DL/T 2565—2022 基于 IEC 60870-5-104 的水电网络通信协议扩充导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [6] 缪立元, 马洪林, 刘鹏. A 电站自动发电控制运行策略研究[J]. 大电机技术, 2024(S1): 12-17.
- [7] 郭鸿业, 陈启鑫, 夏清, 邹鹏. 电力市场中的灵活调节服务: 基本概念、均衡模型与研究方向[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3057-3066+3361.
- [8] 万欣. 龚嘴、铜街子电站自动发电控制(AGC)运行策略[A]. 中国水力发电工程学会信息化专委会、水电控制设备专委会 2015 年学术交流会论文集[C]. 中国水力发电工程学会信息化专委会、中国水力发电工程学会水电控制设备专委会, 2015: 265-269.
- [9] 李正家. 计算机监控系统分段 PID 调节在水电站的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2010, 34(03): 14-17.
- [10] 伍奎, 李润方, 蒋卫. 水电站计算机监控系统的模糊 PID 功率调节[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2004(05): 17-20+27.