

水电站机组调速系统智能优化控制技术研究

邓家东

嘉陵江亭子口水利水电开发有限公司 四川广元 628400

摘要:水电站机组调速系统作为保障电网频率稳定与电站安全高效运行的重点设备,这一控制性能的改良一直是水电站自动化领域的重点研究方向,在传统的控制方针在解决复杂多变的水力条件跟电网需求时显现出明显的不足,本文从调速系统核心控制环节的智能化增进方面入手,深入地探究先进算法模型为重点的改良控制技术。研究由自适应与预测控制理念引入的思路出发,针对特定工况设计精细化的控制策略,有效地增强机组调节品质、运行能力和设备可靠性,给水电站调速系统的技术升级给出实践参照途径。

关键词:水轮机调速系统;智能改良控制;模型预测控制

引言

电力系统的稳定运行对国民经济以及社会发展有着基础性的保障作用,水电站凭借灵活的调峰调频能力,在维持电网频率稳定方面扮演着不可替代的角色,机组调速系统直接控制水轮发电机组的导叶开度跟转速,是实现上述功能的核心执行单元,动态响应特性、控制精度此外稳定性直接关系到电能质量与电站安全。可再生能源大规模接入电网的情况下,电网的结构变得愈发冗杂,由此使水电机组的调节速度跟调节精度面对着更加严苛的要求,传统的依据经典控制理论的调速器,参数一般依据线性化的模型来设定,但面对水轮机繁复的非线性特性、水锤效应此外变水头变负荷等多重扰动时,大多暴露出适应性差、调节的过程容易出现超调、收敛的速度缓慢等不足。所以,从技术发展角度看,智能化技术引入调速系统控制逻辑,研究具备自学习、自适应和预测能力的改良控制策略,已变成加强水电站自动化水平跟运行效能的必然趋势,本文从水电站自动化专业观点出发,深入地分析调速系统智能改良控制的内在价值和目前技术发展现状,然后注重详细的控制环节,提出一套层次分明、切实可行的改良控制技术方案,给工程实践给予理论参照与技术参照。

一、水电站调速系统智能优化控制的核心价值体现

(一) 提升频率调节品质保障电网稳定

电网频率是衡量电能质量跟系统稳定的核心指标,水电机组作为电网频率调节的首要响应者,调速系统的控制性能十分重要,就价值体现而言,智能改良控制技术首先让频率调节的品质得到了显著地增强,传统的比例积分微分控制形式面对负荷突变等大扰动时,总是依

托经验整定的固定参数,不易让快速性与稳定性之间取得最佳平衡,以致使频率恢复的过程出现较大超调或长时间波动。引入智能改良算法,譬如模型预测控制或自适应控制,可以在线或离线地改良控制参数跟输出指令,算法机制方面,这类算法依据系统实时状态与预测模型,针对后续数个采样周期内的控制序列实行滚动改良,控制动作不仅考虑目前的偏差,又前瞻性地顾及后续动态转变。这让机组响应电网频率指令的动态过程变得更平滑,超调量被有效地抑制,调节的时间也缩短了,能更快更准地把系统的频率拉回额定值,大幅增强了电网瞬态稳定的支撑能力,给高比例新能源接入的电网安全稳定运行给出了可靠的保障。

(二) 优化负荷分配与运行效率

水电站一般配置多台机组,根据总负荷指令让各机组实现经济、安全、高效的负荷分配,这是增进电站整体运行效益的重点问题,传统的等微增率法或按比例分配法,大多忽略了机组动态特性差异、水头变化此外振动区限制等因素,容易造成部分机组在低效的运行区域或引发不稳定振动。智能改良控制技术针对负荷改良分配,有着显著的应用价值,在改良模型建立方面,目标设定全厂耗水量最小、运行稳定性最高或融合效益最大,融合机组实际的能力曲线、目前的水头信息和此外设备健康状态等多维约束条件,智能算法可在线求解最优的负荷分配方案。使用遗传算法、粒子群算法等智能寻优方针,可以高效地处理多目标、多约束的非线性规划问题,该技术不光实现了静态的经济分配,更能动态地调节时,协调多台机组的动作顺序和速率,避免负荷剧烈转移引起的管网压力振荡,在满足电网需求的前提下,最大限度地提高水能利用效率,减少厂内损耗,实现电

站的经济改良运行。

二、智能优化控制在调速系统的应用现状

(一) 先进控制算法的理论探索与仿真验证

学术界跟着前沿技术研究的思路,多种先进的控制算法使用到水轮机调速系统的理论探析中已相当活跃,模型预测控制因其显式处理多变量约束以及滚动改良的优点,变成了研究热点,研究人员目的是建立包含水轮机非线性特性、引水管道弹性水锤模型的预测控制器,凭借数字仿真验证了这类控制器改良大波动过渡过程品质的潜力。另外,自适应控制、滑模变结构控制、模糊逻辑控制此外各种神经网络控制策略得到了大量研究,这些方法用来解决系统参数时变、模型不确定等实际问题,上述研究大多依据 Matlab/Simulink、RT-LAB 等平台建立详细的模型,借助阶跃扰动、负荷突变等典型工况测试,证实了智能算法理论部分相较于传统的PID控制有着明显的优势,具体体现的是响应速度更快、超调量更小外抗干扰能力更强,给后续的工程化应用打下了扎实的理论基础。

(二) 传统PID结构与智能算法的结合实践

工程实际应用的立场里,完全摒弃成熟稳定的传统PID控制结构有较高的风险,所以,目前更主流的应用现状是使用一种渐进融合的方式,即保留PID当作底层执行机构的基本控制回路,而智能算法应用到上层,实现参数的自整定或设定值的改良。譬如,许多水电站的调速器已具备依据模糊逻辑或简单规则的PID参数在线自调整功能,系统可根据目前运行的水头、有功功率等工况信息,自动切换或微调PID参数组,让控制器在不同的工作点都能保持良好的调节性能。另一种常见形式的实际应用表现为,借助智能算法如前馈补偿、扰动观测器等手段,针对可测量的干扰如电网频率波动实行预估跟补偿,继而减轻PID主回路的调节负担,这样的融合形式不光保证了技术先进性,又顾及了工程可靠性,有效地减少了现场调试与维护的复杂性,变成目前智能改良控制技术由理论研究迈向工程实践的核心过渡形式。

(三) 调速系统与励磁系统的协调控制初探

水机组的稳定运行依赖于调速系统与励磁系统的协同工作,伴随控制品质要求的增加,单一系统的独立改良已显不足,两者的协调控制变成重要研究方向,目前研究里,相关学者着重设计调速与励磁的协调控制器,用来共同地抑制电力系统低频振荡,增强区域间联络线的动态稳定性。智能改良的框架里,开始尝试把两个系统的模型联合起来考虑,借助线性矩阵不等式或智能改良算法,求解出一组能使融合系统性能指标最优的协调控制参数,虽然此类协调控制方针凭借理论分析和动模

实验已展示出主动效果,但就实际应用而言,因为涉及跨专业系统的深度耦合、现场调试更为繁复,实际电站大规模推广应用实例尚不多见,多数仍在试点或研究性应用阶段,但这代表了水电机组融合控制智能化的重要发展方向。

(四) 数据驱动方法与物理模型的融合趋势

最近几年,水电站监控系统的数据采集与存储能力实现了跨越式发展,数据驱动方法给调速系统的改良开辟了新的维度途径,目前应用现状呈现出数据驱动与物理模型相互融合的态势,一方面,依托运行大数据,使用支持向量机、随机森林等机器学习的方法,开展机组特性辨识或核心参数软测量工作,用来补充或修正物理模型的局限。另一方面,强化学习等算法凭借它跟环境交互学习最优方略的特性,逐渐应用到调速器的直接控制或高层决策范畴,但这类完全依托数据的黑箱模型暴露出许多局限:可解释性不足,训练数据质量要求苛刻,而且非训练工况的可靠性难以保证。所以,目前的研究跟应用更偏好于灰箱或混合的模型,即利用物理模型建立控制框架跟基本动态,再利用数据驱动方法在线修正模型偏差或改良特定的参数,这样的融合的方式不光利用了先验知识保证了系统的可解释性与安全性,又借助数据学习增强了模型的适应性与精确度,是目前技术发展的重要特征。

三、基于模型预测控制的调速系统精细优化策略

(一) 面向频率控制的精细化预测模型构建

要实现有效的模型预测控制,核心的环节是建立可以准确地折射被控对象动态特性的预测模型,针对水轮机调速系统,这类预测模型不能停留于简单的线性近似层面,而需要精细地刻画重点的非线性特征与核心的耦合关系,推荐建立一个集成的预测模型,该模型应包含水轮机出力特性的非线性函数、考虑水流惯性与管道弹性的水锤效应传递模型,此外发电机转子的运动方程。关于水轮机出力特性,可依据模型融合特性曲线或现场试验数据,拟合成水头、导叶开度和转速三个变量的高精度近似函数,水锤模型可使用弹性水击的特征线法实行离散化描述,或根据管道实际情况简化成适用于实时控制的传递函数形式。该集成模型用导叶开度指令做输入,用机组的转速或输出功率做核心输出变量,利用现场历史数据对模型参数实行校核与验证,保证它全工况范围内,特别是大波动的过渡阶段,有着充足的预测精度,该精细化的模型变成后续滚动改良与反馈校正的基础,它的质量直接地决定预测控制性能的上限。

(二) 滚动优化与约束管理策略设计

获得可靠的预测模型后,核心要做好滚动改良方针

的设计工作，每个控制周期内，控制器会根据目前机组状态的实测数据，借助预测模型来推算后续一段时间被控量的转变趋势，接着求解有限时域内的在线改良问题，目标函数一般设计成跟踪误差二次型与控制器输出变化率的加权组合，目的是使后续时刻的频率偏差最小，同时保证控制动作平稳。更核心的一点是，需要把系统的安全与物理极限当作约束条件显式地纳入改良问题里，此类约束包含导叶开度的位置上限、下限跟变化速率限制，机组功率的上限、下限，此外根据引水系统强度计算得到的压力上升率限制，改良问题的求解可借助高效的数值计算库在线地完成，获得最优的控制序列，然后把序列里的第一个控制量施加给实际的对象。每个采样周期都重复这一过程，控制策略得到在线滚动改良，形成闭环反馈，系统所以可以持续地解决外界扰动以及模型失配，在约束条件下始终保持最优或次优控制性能。

（三）结合工况辨识的参数自适应机制

水轮机在不同水头、不同导叶开度时，其动态特性差异显著，一套固定的预测模型参数或改良权重难以获得全工况范围内的最佳控制效果，实际应用需要引入依据工况辨识的自适应机制，可以建立一个由目前的水头和活动导叶开度做索引的二维工况区间划分表。针对每个典型的工况区间，凭借前期的仿真分析与参数整定，预先配置一组跟之匹配的预测模型局部线性化参数或改良目标函数中的权重系数，线上运行时，控制系统会实时地监测水头跟开度信号，自动地识别目前所处的工况区间，然后调用相应的改良参数集。针对水头变化频繁的电站，可更进一步地引入增益调度技术，使参数可以实现不同工况间的平滑过渡，这种机制让模型预测控制器可以适应电站运行条件的变化，不同的水头条件都能保持良好的动态响应特性与稳定性，保证从低水头到高水头的全范围运行性能最优。

（四）与现有监控系统的集成与工程实施路径

要保证改良方略切实可行且可以安全地落地，需要从工程实行途径规划方面着手，重点解决同现有电站监控系统的集成问题，推荐使用分层递进的设计跟部署方案，第一层是保留的原调速器硬件跟基本的PID控制回路，这是最低保障的安全后备。第二层部署于工业控制计算机或高性能可编程控制器里的智能改良控制算法模块，就功能实现思路来看，该模块接收监控系统传来的水头、功率指令、频率偏差等信号，此外调速器传来的目前状态，执行模型预测控制的在线滚动改良计算，然后输出改良的导叶开度设定值或辅助控制指令到底层的调速器。通信架构方面，改良控制模块与监控系统、调速器需要建立可靠且低延迟的数据通信链路，实行时应

按照仿真测试、静态试验、动态小扰动试验的顺序推进，逐步扩大应用范围，实行途径方面，初期可设置成“监视形式”，对比改良指令跟实际指令，验证它的合理性；稳定后切换到“推荐形式”，由运行人员确认后执行，最终当可靠性得到全面验证，进入“自动形式”。这一类谨慎的集成途径最大限度地控制了工程风险，保障了电站的安全稳定运行。

结语

水电站机组调速系统的智能化改良是增进水电机组运行性能、适应新型电力系统发展的关键技术方向，本文使用系统性观点说明了智能改良控制对于加强频率调节品质、改良经济运行、保障设备安全、支撑智能运维等方面的核心价值，分析了目前理论探索到工程融合的应用现状及发展趋势。研究由模型预测控制这一详细技术途径出发，深度探究了精细化预测模型建立、滚动改良与约束管理、参数自适应机制以及工程集成方案的完整改良方案链条，所提出的方针主张理论性与工程实用性的融合，力求找到先进控制理念跟现有自动化系统架构的可行接口。实际应用说明，使用这类精细化的智能改良控制技术，可有效地加强水电机组调速系统的自适应能力、控制精度与融合效益，给水电站的自动化、智能化升级给出直接的技术支撑，继而给建立安全、高效、清洁的现代能源体系贡献力量。

参考文献

- [1] 罗帅.长洲水电站灯泡贯流式机组调速系统改造方案及实施效果研究[J].红水河, 2025, 44(04): 142-146.
- [2] 李程.基于调速系统的水电站机组动力学研究[J].电气技术与经济, 2023, (07): 13-16.
- [3] 胡保修, 吕兴强, 刘昆, 等.西南异步互联下某大型水电站抑制低频振荡的调速系统参数优化与功能研究[C]//中国水力发电工程学会自动化专业委员会.中国水力发电工程学会自动化专委会2022年年会暨全国水电厂智能化应用学术交流会会议论文集.雅砻江流域水电开发有限公司, 2022: 336-340.
- [4] 姚万灿, 刘大燕, 张一帆.论国产调速器在峡江水电站贯流式机组的应用[C]//江西省电机工程学会.2021年江西省电机工程学会年会论文集.国家电投集团江西峡江发电有限公司, 2022: 391-393.DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.001519.
- [5] 沈岸.大型水电站异步联网模式下机组调速系统优化[J].水电站机电技术, 2021, 44(10): 138-140. DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2021.10.045.