

水电厂自动发电控制性能优化研究

朱春宇

新疆塔里木河流域乌鲁瓦提水利枢纽管理中心

DOI:10.12238/hwr.v9i4.6250

[摘要] 随着全球能源结构的调整和可再生能源的快速发展,水电厂作为灵活调节电源的角色日益凸显。自动发电控制系统是水电厂实现精确、快速负荷调节的关键技术,对于保障电网稳定、提高电力系统整体效率具有重要意义。然而,自动发电控制系统在实际应用中面临着复杂的电网环境、多变的水力条件以及日益严格的环保约束。这些因素对自动发电控制的性能提出了严峻挑战,如控制精度不足可能导致电网频率波动,影响电力市场交易的公平性。因此,深入研究自动发电控制性能优化技术,不仅有助于提升水电厂的经济效益,也是实现电力系统现代化和可持续发展的重要途径。

[关键词] 水电厂; 自动发电控制; 性能优化

中图分类号: TV731 **文献标识码:** A

Research on Performance Optimization of Automatic Generation Control in Hydroelectric Power Plants

Chunyu Zhu

Wuluwati Water Conservancy Hub Management Center in Tarim River Basin, Xinjiang

[Abstract] With the adjustment of global energy structure and the rapid development of renewable energy, the role of hydropower plants as flexible power sources is increasingly prominent. The automatic power generation control system is a key technology for achieving precise and rapid load regulation in hydropower plants, which is of great significance for ensuring grid stability and improving the overall efficiency of the power system. However, automatic power generation control systems face complex grid environments, variable hydraulic conditions, and increasingly strict environmental constraints in practical applications. These factors pose serious challenges to the performance of automatic power generation control, such as insufficient control accuracy that may lead to fluctuations in grid frequency and affect the fairness of electricity market transactions. Therefore, in-depth research on the optimization technology of automatic power generation control performance is not only helpful for improving the economic benefits of hydropower plants, but also an important way to achieve modernization and sustainable development of the power system.

[Key words] hydropower plant; Automatic power generation control; performance optimization

引言

在当前的能源格局中,水电作为一种清洁、可再生的能源,其开发与利用受到了广泛关注。随着技术的进步和智能电网的发展,水电厂在电力系统中扮演着越来越重要的角色,尤其是在负荷调节和电网稳定方面。自动发电控制系统作为水电厂的核心技术之一,其性能的优化直接关系到水电厂的运行效率和电网的整体稳定性。

1 水电厂自动发电控制系统

1.1 自动发电控制系统的基本构成

水电厂自动发电控制系统是现代电力系统中不可或缺的重要组成部分,它确保了电网频率的稳定和电力市场的经济调度。自动

发电控制系统的基本构成通常包括以下几个关键部分:第一,信息采集单元,如高精度的测频设备和遥测系统,实时收集电厂的发电状态和电网的频率偏差数据;第二,控制中心,处理和分折来自各个电厂的数据,执行优化算法以确定最佳的调整指令;第三,调节设备,如水轮机调节器和发电机励磁系统,根据控制中心的指令快速调整发电功率;第四,通信网络,保证控制信号在电厂与调度中心之间的快速、可靠传输。这些组件协同工作,使水电厂能够在几秒钟内响应电网的频繁调度指令,提高整个电力系统的运行效率和稳定性。

1.2 自动发电控制的工作原理与控制策略

水电厂自动发电控制系统是现代电力系统中不可或缺的一

部分,它通过实时调整水电厂发电机的输出功率,以保持电网频率和电压的稳定。自动发电控制的工作原理基于高级的控制算法,如比例积分微分(PID)控制器,结合现代的预测控制策略,确保在多变的电力市场条件下,水电厂能够快速响应调度指令。

在实际操作中,自动发电控制系统通常由监控中心、通信网络和现场控制设备组成。监控中心根据电网状态和预测模型计算出最优的功率调节指令,这些指令通过高速通信网络传递到各个水电站的控制室。现场控制设备,如励磁调节器和导叶控制系统,根据接收到的指令调整发电机的运行参数,以改变输出功率。

控制策略的先进性直接影响到自动发电控制的性能。例如,模糊逻辑和神经网络等智能控制方法可以增强系统对非线性动态特性和不确定性的适应能力。此外,考虑到水电厂可能并联运行多个机组,多机组间的协调控制策略也至关重要,通过优化机组间的功率分配,可以减少功率波动,提高整体系统的稳定性。

1.3 自动发电控制在水电厂中的应用挑战

水电厂自动发电控制系统在提升电力系统稳定性与经济性方面发挥着关键作用。然而,自动发电控制在实际应用中面临着多重挑战。首先,水电厂的出力受到水文条件、水库调度以及机械磨损等复杂因素的影响,这些不确定性可能导致自动发电控制效果的波动。其次,随着可再生能源并网比例的增加,电网的非线性特性加剧,对自动发电控制的快速响应和精确控制能力提出了更高要求。此外,跨区域的电力交易和动态的电力市场机制也要求自动发电控制系统具备更强的适应性和灵活性。

在模型层面,传统的自动发电控制模型通常假设为线性或静态的,难以准确刻画水电厂动态的非线性行为。因此,需要发展更精细的动态模型和在线校正技术,以应对这些挑战。在控制策略上,当前的自动发电控制往往侧重于单个电厂的优化,而忽视了与电网其他控制系统的协调。这可能导致控制指令间的冲突,降低整体系统的稳定性。因此,研究多目标、多层级的协调控制策略,实现水电厂与电网的深度融合,是未来自动发电控制优化的重要方向。

解决自动发电控制在水电厂中的应用挑战需要跨学科的创新,包括但不限于先进的控制理论、数据驱动的建模方法以及灵活的市场机制设计。只有这样,才能确保自动发电控制在复杂电力系统环境中的高效、稳定运行,为实现电力系统的绿色转型和可持续发展提供强有力的技术支撑。

2 自动发电控制性能评价指标

2.1 传统性能指标分析

在水电厂自动发电控制性能的评估中,传统性能指标分析扮演着基础性角色。这些指标通常包括调节精度、响应速度和稳定性三个方面。调节精度是指自动发电控制系统在电网频率或电压指令变化时,水电厂出力能够快速并准确地跟踪指令的能力。例如,可能会关注频率偏差的绝对值,以百分比的形式表示,要求在短时间内将偏差控制在允许的范围,如 $\pm 0.1\text{Hz}$ 。

响应速度则关注自动发电控制系统对指令变化的快速反应,通常通过上升时间或调节时间来衡量。例如,系统可能要求在电网频率变化后的10秒内,水电厂的出力调整达到90%的最终目标。稳定性是确保自动发电控制系统长期运行不出现振荡或不稳定状态的指标,这通常通过分析闭环系统的根轨迹或者使用稳定性裕度来评估。

在实际分析中,研究者会结合具体案例,如某水电厂的历史运行数据,计算这些传统指标并对比行业标准或同类型电厂的表现。通过这些指标的量化分析,可以识别自动发电控制系统的性能瓶颈,为后续的优化策略提供依据。然而,随着电力系统复杂性的增加,这些传统指标可能无法全面反映自动发电控制在现代电力市场中的复杂动态行为,因此,现代性能评估体系引入了更多面向实际运行环境的评价指标。

2.2 现代性能评估体系

现代性能评估体系在水电厂自动发电控制性能优化中扮演着至关重要的角色。传统的评估指标,如调节精度、调节速度和频率偏差,虽然能够提供基础的性能评估,但往往无法全面反映自动发电控制在复杂电力系统环境中的实际效果。因此,现代评估体系引入了更多维度的考量,如考虑电力市场的经济性指标,如机组的边际成本计算和市场出清价格的适应性,以确保自动发电控制不仅满足电力系统稳定性,还要兼顾经济效益。

此外,现代评估体系还关注自动发电控制对系统频率稳定和电压质量的贡献,通过分析在大规模可再生能源并网情况下的频率恢复能力,以及在电压异常时的动态响应特性。例如,引入综合性能指标(CPI),它结合了调节误差、超调量、恢复时间等多个因素,以一个综合分数来量化自动发电控制的综合性能。

在实际应用中,可能还会结合数据驱动的评估方法,利用大数据和机器学习技术对海量运行数据进行挖掘和分析,识别出影响自动发电控制性能的关键模式和异常行为。例如,通过建立基于深度学习的预测模型,可以预测自动发电控制在不同运行条件下的性能,从而提前采取优化措施。

2.3 影响自动发电控制性能的关键因素

水电厂自动发电控制系统的性能受到多种关键因素的影响,包括但不限于模型准确性、电网动态响应、控制策略的适应性以及外部环境条件。模型准确性是自动发电控制性能的基础,不准确的水轮机或发电机模型可能导致控制指令的偏差,影响频率调节的精度。电网动态响应的变化,如负荷波动或并网可再生能源的不稳定性,要求自动发电控制系统具备快速的自适应能力。此外,控制策略的复杂性和协调性也至关重要,传统的PID控制可能在多目标优化问题中表现不足,需要结合现代控制理论和智能算法进行优化。例如,引入模糊逻辑或神经网络可以提高控制系统的非线性动态响应。外部环境条件,如温度、水文条件的变化,会直接影响水电厂的出力潜力,因此实时的环境监测和预测也是确保自动发电控制性能稳定的关键。

3 自动发电控制性能优化技术

3.1 模型校正与不确定性处理

在水电厂自动发电控制系统中,模型校正与不确定性处理是提升性能优化效果的关键环节。模型校正旨在确保自动发电控制策略基于准确的系统动态模型,因为任何模型误差都可能导致控制指令的失准,进而影响电力系统的稳定性和效率。例如,当水电站的水轮机模型未考虑到水锤效应或机械磨损时,实际响应可能与预测存在显著偏差,影响自动发电控制的快速调节能力。

不确定性处理则关注于如何在存在数据不全、测量噪声或未来负荷预测误差的情况下,设计鲁棒的控制策略。这通常涉及使用鲁棒控制理论或概率方法,如模糊逻辑、神经网络或蒙特卡洛仿真,以适应系统参数的变化和未知扰动。

3.2 智能优化算法在自动发电控制中的应用

智能优化算法在自动发电控制性能提升中扮演着至关重要的角色。这些算法能够处理复杂的非线性优化问题,以提高水电站的发电效率和电网的稳定性。例如,遗传算法可以用来寻找控制参数的最佳组合,以最小化频率偏差和调节响应时间。此外,粒子群优化(PSO)和蚁群算法等群体智能方法也被用于动态调整机组的输出,以适应电网负荷的变化。在实际应用中,可能需要结合多种优化算法,形成混合智能优化策略,以克服单一算法可能遇到的局部最优问题。

为了确保优化效果的长期有效,需要结合在线学习机制,使自动发电控制系统能够根据实时运行数据自我调整和学习。这样的自适应优化策略可以适应不断变化的电网条件和设备性能,进一步提升控制性能。然而,智能优化算法的应用也面临一些挑战,如计算量大、实时性要求高等。因此,未来的研究需要关注如何在保证控制性能的同时,降低算法的计算复杂度,以适应实时控制的需求。

3.3 协调控制策略的开发与实施

协调控制策略在水电厂自动发电控制性能优化中起着至关重要的作用。传统的自动发电控制系统往往侧重于单个控制对象的优化,如发电机的功率调节,但忽视了系统整体的动态平衡和各子系统间的相互影响。因此,开发协调控制策略旨在提升自动发电控制的全局性能,确保在多变的电网条件下,水电站能够快速、稳定地响应调度指令(如频率调整、功率曲线跟踪等)。

在协调控制策略的开发过程中,首先需要建立考虑各种运行工况和外部扰动的多物理场动态模型。例如,通过考虑水力、机械和电气系统的耦合效应,可以更准确地预测机组的动态响应。此外,模型应包含关键设备的非线性特性和时变参数,以提高模型的适应性。

接下来,引入多层控制结构,结合模型预测控制(MPC)和智能优化算法(如粒子群优化、遗传算法等),设计分层的控制逻辑。

初级控制层负责快速局部调整,而高级控制层则负责全局优化决策,确保各控制子系统的目标一致。通过实时在线优化,可以动态调整控制参数,以应对电网频率、电压等关键指标的变化。

在实施协调控制策略时,需要进行大量的仿真验证和实验室试验,以评估策略的有效性和鲁棒性。例如,通过与实际水电站的数字孪生系统对接,可以模拟各种工况,优化控制算法在不同场景下的性能。此外,实际部署前应进行小规模现场试验,逐步调整和优化控制策略,确保其在实际运行中的稳定性和安全性。

最后,协调控制策略的实施还需要考虑与电厂现有控制系统的集成,以及操作人员的培训和接受程度。通过逐步引入和更新控制逻辑,可以降低实施难度,同时配合完善的监控和报警机制,以防止潜在的运行风险。

4 结束语

综上所述,水电站自动发电控制性能的优化是一个持续发展的领域,随着技术的不断进步和电网结构的日益复杂,对自动发电控制系统的性能提出了更高的要求。未来的研究应聚焦于更精细的建模技术、更智能的控制算法以及更高效的协调控制策略,以应对电力系统中的各种不确定性和挑战。同时,跨学科的合作和创新将是推动自动发电控制性能优化的关键,通过结合控制理论、数据科学、能源经济学等领域的最新成果,我们可以期待水电站自动发电控制系统在未来发挥更加重要的作用,为实现电力系统的绿色、高效、稳定运行贡献力量。

参考文献

- [1]吴涛,梁浩,谢欢.励磁系统控制关键技术与未来展望[J].发电技术,2021(2):160-170.
- [2]王越.水电厂自动发电控制系统的调节与优化策略分析[J].自动化应用,2018(03):119+125.
- [3]黄宝珠.简要分析自动发电控制技术在水电厂中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2017(08):78.
- [4]胡林,唐海,李毅.南方电网水电厂自动发电控制算法设计及调节性能评估[J].水电与抽水蓄能,2017,15(5):44-49.
- [5]陶然,姚隽.云南木加甲水电站PSS试验及励磁系统控制[J].水电站机电技术,2017(1):29-31.
- [6]彭天波,王楠,孙刚.水电机组一次调频技术要求及与二次调频协调控制的实现方法[J].湖北电力,2017,41(6):28-31.

作者简介:

朱春宇(1990--),男,汉族,辽宁昌图人,大学本科,水利专业工程师,研究方向:水电方向信息化管理等。