

水电站运行安全中的继电保护配置优化与可靠性分析

熊苑莉

国能大渡河瀑布沟水力发电总厂 四川雅安 625304

摘要：水电站是电力网络的核心，水电站的运转稳定直接影响电网运行和供电可靠性。而继电保护是保障水电站稳定运行的基本技术手段，继电保护的布置质量和性能对机组的故障解决、防止电网事故发生具有关键作用。但是当前的水电站继电保护在配置的科学性、自适应性以及智能性方面存在不足，使继电保护的工作效率低、反应滞后及发生冲突频繁现象，使设备老化加快，增加了操作的风险性。本文针对水电站运行安全的需求，从水电站继电保护功能定位、技术规范和未来发展趋势切入，分析水电站在继电保护配置中存在的问题和潜在风险，给出了基于继电保护配置优化和配置可靠性的改进措施。本方案旨在通过搭建多层优化架构，运用计算机技术，形成保护配置评估模型和保护配置预警模型，提升保护配置的科学性和保护系统整体运行的可靠性。

关键词：水电站；运行安全；继电保护；配置优化

引言

水电作为中国能源构成中的重要支柱，在提供清洁能源的同时还担负着维持电能供需平衡、维持频率稳定、确保应急备用等多种功能。然而随着水电建设规模的增大、工况越来越恶劣，水电安全受到的威胁日益扩大。继电保护是水电站电力系统安全的最后一道关口，它在设备发生异常或电网遭遇故障时可以迅速作出响应，将灾害降低到最小，从而确保水电站电力系统的稳定运行。因此，如何合理设置继电保护并加强继电保护的有效性已经成为水电站能否正常运行的关键问题。近年来，随着自动化、数字化的信息化技术的快速发展，继电保护不论是理论还是实践都取得了相当大的突破，但在冗余性、自适应性、协调能力、辨识故障能力方面还有较大提升空间。

1 水电站运行安全与继电保护理论基础

1.1 水电站运行安全的基本特征与风险构成

水电站安全运行具有高度的复杂性和多样性，主要体现在安全运行的环境复杂性、设备相关性及安全风险的突发性。在环境方面，绝大多数水电站建在地形地质和气候条件复杂多变的地方，自然环境灾害诸如洪灾、地震和泥石流等都会给水电站正常运行造成严重影响。同时，水电站的电力设备相互关联紧密，如发电机、变压器、主变压器至输电线路等，任何一个设备出现问题都可能会形成“多米诺效应”，导致系统失败。一般而言，运行风险往往伴随有瞬时发生的

不可预见的突发因素。例如，线路的断路、超负载、绝缘损坏等状况都会在一瞬间发生，继电保护无法及时反应可能引起大面积停电或者设备损坏。简单来说，水电站运行安全生产威胁可以归为3大类：自然灾害威胁、机具威胁和系统威胁，这些都无法通过人类的意志得以回避，只能通过科技手段对其进行防范和管控。

1.2 继电保护在水电站电力系统中的功能与技术要求

继电保护在水电站电力系统运行过程中主要目的是及时准确分断故障的设备，防止故障扩散、保护非故障部分。它包含了故障检测、决策、故障隔离和系统恢复4个环节，从技术上要求具备高灵敏度、高选择性、快速性以及可靠性。依据感度要求，继电保护应在最小故障电流条件下可靠捕捉故障点和进行动作，以消除可能发生的保护死区；根据选择性的要求，继电保护能将故障点准确找到，将故障点切除，而不切除正常设备，不扩大停电范围；快速性作为基本要求之一，要求继电保护应尽可能快地检测故障和做出反应，降低设备受损概率和减少系统不稳定的潜在性；可靠即要求继电保护在长期运行过程中要确保动作的正确性和抗干扰的能力。

1.3 继电保护配置与可靠性分析的研究价值与发展趋势

水电站继电保护的配置及可靠性分析具有研究水电站运行安全性的重要作用。适当的保护配置能够最大限度地减少事件的损失，提高系统的冗余性和容错能力；设备及系统

的可靠性分析则为确定运行策略提供参考依据及做出优化决策。在当前智能电力系统阶段，继电保护研究方向趋向于以下几个方面。随着配制优化由单一层次和个别覆盖向着多层次覆盖和全面覆盖的方向发展，优化不再单纯为单台装置安全工作的需求而考虑，而是逐步重视系统的配合及互动作用，并将对安全的关注程度越来越详细和信息化，在概率论及可靠性工程模拟技术的使用下对电气保护设备的动作原理及设定方式予以量化评定。

2 水电站继电保护配置中的现实瓶颈与风险隐患

2.1 保护配置冗余不足与适应性不强

在水电站安全运行中，其继电保护配置方案和可靠性分析评价至关重要。在系统运行过程中通过适宜的保护配置策略，尽量减小系统遭到事故干扰的几率，保证系统更全面、更完善的冗余度和容错度；可靠性分析可对保护配置及其系统的可靠程度进行评价，为实际运行和制定策略提供依据。在电力系统向智能电网的发展进程中，继电保护研究的重点方向为以下四项：逐级从单个设备的分析到多层、全方位的角度出发进行保护考虑，不仅考虑到设备的保护需求，同时注重系统之间协调和互动作业。随着可靠性分析的发展日渐细化的数字分析方法，借助概率统计学、可靠性工程以及模拟工程等方法对水电设备安全保障系统的继电保护系统的运行过程与设定方法进行定量分析，采用智能信息科学技术让继电保护自主调整自身状态并在线监测其运行情况，极大地提高了它对复杂环境及新型故障的应对能力。

2.2 动作选择性与整定协调矛盾突出

最基本的要求就是要达到继电保护的选择性和配合性，但这两者间却是在水电站实际运用过程中最易出现矛盾的情况。选择性是指保护装置只针对故障点的保护范围工作，不会对非故障点产生影响；而配合性则是指各种不同保护装置的动作程序和动作时间配合得当。但是随着电力系统的大幅度发展，使继电系统的联系更加紧密，由于短路电流分布的复杂性以及故障点电流特性差异性的逐渐缩小，已经导致了选择性判断的难度相应增加。为了提高灵敏度，有一些保护装置的动作值降低，却也同时影响了各个保护装置的动作顺序的配合。另外，水电站大多为多个设备同时运行，传输功率距离较近且有较多的连接线，可能会导致保护范围发生重叠现象，导致保护范围划分不确定、动作经常发生冲突问题。

2.3 保护设备老化与运行环境复杂导致的可靠性下降

电力保护系统是确保水电站安全运行的主要保护系统，由于设备老化及环境复杂，电气保护系统时常不能维持稳定运行。部分早期电厂仍采用传统机械电气保护或早期微型计算机控制系统，噪声抗御能力低、精确度差且无自检能力，降低了运行准确率。另外，水电站经常处于高湿、温度变化大、有蒸发、凝结、积灰尘以及电磁干扰等恶劣环境，加速了保护系统性能恶化。尤其是偏僻山区或者一些山地，保护站维护配套设施薄弱，缺乏完善的保护检查制度，进一步增加了可靠性难度；加之很多地区存在老设备和新设备并存的情况，旧保护系统和新保护系统的通讯方式、信息交换与整合能力相差巨大，增加整个系统的协同难度。总的来说，由于设备陈旧性及外界条件的影响，造成继电保护的长期稳定下降，若缺乏监控及更新机制，则水力发电厂的安全运行将面临很大风险。

2.4 监控与数据分析不足限制了故障诊断与预警能力

对于当前的电气网络环境而言，智能化的监测以及数据分析功能对提升继电保护设备的运行效率具有十分重大的意义。然而部分水电站的这两个方面均还存在明显的不足。传统的监视装置主要任务是完成对实时操作指标的采集，而对于保护装置的运行状况以及故障种类的信息均无法进行体现，如此一来便无法形成后期检测与评价的数据支撑。同时数据信息解析大都采取了离线的方式，缺乏即时性，缺乏即时运算能力，从而对于潜在问题的察觉与发现存在不足。例如，若故障电流幅值变化不显著或持续时间短，在保护装置中难以及时正确识别解析，导致保护措施执行的准确度不足。同时，由于数据隔离现象的普遍性，不同的系统数据互换和共享的方式不同，也阻碍了跨平台故障监测和统一警报。当前应用智能化技术和大数据处理手法刚刚起步，无法充分发挥二者预判和辅助解决故障复杂处理的作用。

3 基于优化与可靠性分析的继电保护配置改进路径

3.1 构建多层次的继电保护配置优化体系

水电站电气安全自动防护系统的综合防护能力要进一步提升，我们必须构建复合化布局的防护体系，从硬件设备层面对发电机组、升压变、低压开关柜、配电线缆等关键位置的属性和运行特征进行有针对性的部署计划设计，对于关键设备设计备用防护和独立电源，发生单一设备故障能维持冗余运行功能；从防护体系层面对水电站单独的区域防护系

统要脱离原先的离岛式保护概念，构建电网与水电站相结合的全局防护体系，实现各个层次、地域和等级的交互优化。例如，可以在厂内层面实现主备保护协调统一，可以在外部和电力网络保护同步，形成有序的多级互动格局。就管理工作来说，应将继电保护纳入全面的安全管理过程中，形成自设计、安装、运行到维修的全程最优的闭环体系，还需用标准化的方法提高统一性。

3.2 引入智能化方法提升保护配置的自适应能力

人工智能可实现自动的继电保护整定。人工智能和大数据的应用可实现在电力系统运行状态的实时检测，进行相应的调整。比如，应用机器学习的方法建立历史故障历史和操作信息模型，判断故障类型并预测故障发生的可能性，以便提前优化保护设置值。深度学习可提取复杂电网的特征，在较小的故障信息下提高保护装置的鉴别能力。除此之外，可以建立自我调整的安全保护，在根据用电负荷、电流分配变化、电网结构实时变化的前提下，进行动态调整安全设置，避免因固化设置不当造成的误动或拒动的发生。在实际应用时，通过结合边沿计算技术和云计算服务器，使设备之间的信息传递更加密切以及相互做出判断，使系统的自我调整性能更强。

3.3 建立可靠性评估模型与指标体系

可靠性评估可以得到关于如何实现继电保护配置优化的支持，因而建立一套保护设备及其设定的可靠性评估模型和评估指标也是必不可少的。模型方面，可以借助可靠性工程相关原理及相关工具，如故障树分析(FTA)和马尔可夫链(MarkovChain)等来建立保护设备及其配置的可靠性评估模型，从而求解保护设备及其配置的失败率和正确的动作率；指标方面，提出保护设备及其配置行动可靠性、错误反应率、拒动率、平均故障间隔时间和可用度等相关指标来全面评估保护设备和配置性能。例如采用 $R(t)=e^{(-\lambda t)}$ 作为最基本的评定方法， λ 代表故障率， t 则对应设备使用时间，在确保准确且有效性的前提下，将模拟与实测数据有效融合，并利用电力系统的仿真环境进行多种状态的测试证明该方法的合理性和真实性。

3.4 构建风险预警与动态响应的保护管理机制

做好继电保护整定工作，保障操作平稳、安全的进行。

构建多源风险管控数据架构，收集的各类风险监测数据源包括但不限于发电出力和电量、电压、功率因素、热量及其他外部影响因素，全面掌握设备运行状态。运用故障识别及模式识别方法，及时发现预警故障。建立分级报警机制，对报警进行分级管理，包含但不仅限于：一般报警、重要报警、紧急报警。例如，当进入了最初的危险等级时，就应该启动数据分析与人工检查工作；一旦达到高危等级，就应该重新调整参数；倘若出现危急等级，就要立刻启动防护措施避免造成更大危险。对于动态响应模式来说，关键的思路就是实现自动化与智能化，在此基础上通过智能控制系统，对保护参数进行持续的完善，对行动方案的调整实现快速变动。

4 结语

继电保护配置优化必然要基于可靠性评价来进行，因此，有必要建立科学完整、系统可行的可靠性评价指标体系和评价模型。在模型层面，可以通过可靠性工程的方法和技术结合故障树分析(FTA)技术和马尔可夫链(MarkovChain)来为保护元件及保护设置进行建模，以准确计算出其失效概率和动作精度。在评价指标方面，应建立由使用动作可靠性、失败率、拒动次数、无故障工作时间(MTBF)、使用度等核心指标组成的整体功能评价体系。例如，借助一个基础模型 $R(t)=e^{(-\lambda t)}$ ， λ 是故障概率， t 是工作的时间，基于准确有效的模拟试验数据结合电力系统仿真环境的多种实验效果加以验证，以保证评价结果的权威性和有效度。

参考文献：

- [1] 裴冬.某小型水电站继电保护升级改造及可靠性评估[J].电力设备管理, 2024(20):197–199.
- [2] 谢婷.水电站继电保护及安全自动装置的故障排查[J].数码精品世界, 2023(6):541.
- [3] 陈华平.研究水电站二次回路继电保护的应用初探[J].水上安全, 2023(9):109–111.
- [4] 王建国.水电站继电保护隐藏故障及诊断方法研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023.
- [5] 范栋.基于Apriori算法的水电站继电保护研究[J].电气技术与经济, 2024(11):53–55.