

水电站水轮机组状态监测与故障诊断技术及在金沙江上游巴塘水电站应用

鞠军

南京河海南自水电自动化有限公司 江苏南京 210000

DOI:10.12238/ems.v7i9.15256

[摘要] 利用振动监测、温度监测、压力监测以及流量监测等多种状态监测技术获取机组运行实时数据,借助基于规则、信号处理、机器学习以及多传感器信息融合等故障诊断方法对数据进行分析来判断故障类型和位置。这项技术在巴塘水电站的应用取得了良好效果,在技术层面提升了故障早期预警能力和机组运行效率,在经济层面减少了非计划停机时间和维修成本且增加了发电收入,在社会层面保障了当地电力供应并推动了水电行业技术进步。

[关键词] 水电站水轮机组; 状态监测技术; 故障诊断方法

随着我国水电事业持续不断地发展,金沙江上游巴塘水电站作为关键的能源供应枢纽,它水轮机组的稳定运行对保障当地经济社会发展和电力供应稳定性意义重大。

一、水轮机组状态监测与故障诊断技术概述

(一) 状态监测技术

振动监测是利用安装在水轮机、发电机等关键部位的振动传感器,实时捕捉机组运行过程中的振动信号,由于机组机械部件正常和异常运行时振动特征有明显差异,所以通过对这些振动信号进行分析,能够及时发现轴承磨损、转轮不平衡等机械故障隐患,在水轮机组的轴承、绕组等部位安装温度传感器,持续监测其温度变化,因为设备温度是反映其运行状态的重要指标,一旦温度出现异常升高,很可能意味着设备存在过载、短路或者散热不良等问题,及时发现温度异常有助于避免设备因过热而损坏。

(二) 故障诊断方法

基于规则的故障诊断方法是依据专家经验和机组运行规范制定一系列故障判断规则,一旦监测数据满足特定规则就能判定机组存在相应故障,此方法简单直接但对复杂故障诊断能力有限,基于信号处理的故障诊断方法是对监测信号开展滤波、频谱分析等处理来提取故障特征,如对振动信号进行频谱分析可识别特定频率振动分量进而判断有无机械故障。

基于机器学习的故障诊断方法在近年来发展速度很快,它借助大量历史数据对模型进行训练让模型学习正常和故障状态下的数据特征,当有新的监测数据输入时模型能依据所

学知识进行故障诊断,该方法具备较高准确性和适应性可处理复杂故障情况。

二、金沙江上游巴塘水电站概况

(一) 电站基本信息

金沙江上游的巴塘水电站处在中国四川省甘孜藏族自治州巴塘县跟西藏自治区芒康县交界地带的金沙江干流之上,是金沙江上游规划当中十三级水电站里的第九级电站,其坝址的地理坐标是北纬 $30^{\circ} 08'$ 、东经 $99^{\circ} 05'$,这座电站设计的正常蓄水位为 2545 米,总装机容量能够达到 75 万千瓦,安装着三台单机容量为 25 万千瓦的混流式水轮发电机组。作为金沙江上游水电开发的重要枢纽工程,巴塘水电站以发电为主要功能,同时兼顾生态环境用水方面的需求,其水库的总库容大约为 1.37 亿立方米,调节库容大概为 0.24 亿立方米,属于日调节类型的水库,电站枢纽主要由挡水建筑物、泄洪消能建筑物、引水发电系统等部分组成,混凝土面板堆石坝最大坝高大约为 72 米。

(二) 水轮机组运行环境特点

巴塘水电站水轮机组运行环境具备显著高海拔高含沙量复杂水文气候特征,坝址区域海拔高度接近 3000 米,大气压力较低致使机组运行时空气绝缘强度下降且散热条件相对不利,这对发电机组绝缘性能和冷却系统提出了更高要求,金沙江上游流域地质构造活跃且地表侵蚀强烈,使得河水含沙量常年处于较高水平,实测多年平均含沙量约为 2.5 千克/立方米,汛期最大含沙量甚至可超过 10 千克/立方米,高含沙水流对水轮机过流部件如转轮叶片活动导叶固定导叶及尾

水管里衬造成持续性磨蚀损伤，加剧了空蚀与磨损的联合破坏作用严重威胁机组效率和运行寿命。

水体携带硬质石英砂粒和矿物质杂质，不仅加速机械磨损还影响散热效率，水文条件上金沙江上游径流年内分配极不均匀，丰枯季流量差异巨大要求机组宽负荷运行，最大洪峰流量可达数千立方米每秒且枯水期流量骤减，频繁启停调峰增加机组疲劳损伤风险，水温年际变化范围处于 4 摄氏度至 22 摄氏度之间，低温水特定工况易诱发转轮空化现象，电站所在区域昼夜温差大冬季严寒会导致引水系统结冰，夏季强紫外线辐射加速户外电气设备老化进程。

三、巴塘水电站水轮机组状态监测实施

（一）监测系统构建

在整个监测系统的总体架构设计方面，该系统采用分层分布式结构，其中涵盖传感器层、数据传输层、数据处理与分析层以及应用层，传感器层作为整个监测系统的数据源头，在水轮机组的轴承、转轮、发电机绕组等关键部位安装了振动传感器、温度传感器、压力传感器和流量传感器等多种类型传感器，这些传感器能够实时且精确地采集机组运行过程中的各项参数，为后续故障诊断和状态评估提供基础数据。

监测系统总体架构设计表

层次	功能描述	关键组件	技术与方法
传感器层	数据源头，实时精确采集机组运行参数	振动传感器、温度传感器、压力传感器、流量传感器	安装于水轮机组关键部位
数据传输层	安全可靠传输数据至数据处理与分析层	有线和无线传输方式	数据加密和校验机制
数据处理与分析层	处理分析大量数据，挖掘信息，识别状态变化和故障隐患	故障诊断模型、专家知识库	数据清洗、滤波、特征提取
应用层	为管理人员提供操作界面，实时监控机组状态	操作界面	远程控制、参数设置

（二）传感器布置方案

在水轮机的转轮部分为监测其运行状态，在转轮叶片表面安装应变片传感器，用于实时测量叶片受水流冲击应力变化，目的是及时发现叶片有无裂纹或疲劳损伤等问题，同时在转轮周围布置振动传感器，通过监测转轮振动频率和幅值情况，来判断转轮是否处于平衡稳定状态，若振动出现异常可能预示着转轮存在磨损、腐蚀或异物附着等状况。在水轮机的导水机构处安装位移传感器，以此来监测导叶的开度具体情况，确保导叶能够按照控制指令准确动作，因为导叶开度精确控制对水轮机流量调节和效率提升很重要，还在导水机构处布置压力传感器，用于测量导水机构内部的水压力大小，以此来评估导水机构工作性能和水力稳定性。

在发电机的发电机部分，为了能够监测定子绕组的温度，

供基础数据。

数据传输层的任务是把传感器采集到的数据安全且可靠地传输到数据处理与分析层，采用的是有线和无线相结合的传输方式，针对距离较近并且环境相对稳定的区域采用有线传输，以此保证数据传输的稳定性和实时性，而对于一些不容易进行布线的区域就采用无线传输，利用先进的无线通信技术确保数据能够准确传输，同时为防止数据在传输过程中出现丢失或者损坏的情况，系统还设置了数据加密和校验机制。

数据处理与分析层作为监测系统的核心，会运用先进计算机技术和数据分析算法，对传输过来的大量数据进行处理和分析，通过数据清洗、滤波以及特征提取等操作，挖掘数据背后隐藏的有价值信息，识别机组运行状态的变化趋势和潜在故障隐患，并且该层建立了故障诊断模型和专家知识库，能够依据数据分析结果自动开展故障诊断和预警。

应用层为电站管理人员和技术人员提供直观便捷操作界面，借助这个界面可实时查看机组运行状态、历史数据和故障诊断结果，还能够进行远程控制和参数设置等操作，实现对水轮机组的智能化管理和监控。

对水轮机组的智能化管理和监控。

（三）监测数据采集与管理

在定子槽内埋设了温度传感器，由于定子绕组在运行过程中会产生热量，过高的温度可能导致绝缘老化甚至短路故障，所以实时掌握定子绕组温度对于保障发电机的安全运行十分关键，在发电机的轴承部位，安装了温度传感器和振动传感器，温度传感器用于监测轴承的温度变化情况，振动传感器则用于监测轴承的振动具体情况，因为轴承的温度和振动异常往往是轴承磨损、润滑不良或安装不当等问题的表现，在发电机的冷却系统当中，安装了流量传感器和温度传感器，流量传感器用于监测冷却介质的流量大小，温度传感器用于监测冷却介质的进出口温度状况，通过对冷却系统参数的监测可以确保发电机的冷却效果，避免因冷却不足导致发电机过热损坏。

数据采集依据水轮机组不同部件运行特性与监测需求,于关键部位合理布置各类传感器,像在水轮机转轮、发电机定子绕组以及轴承等位置,分别安装振动、温度和压力等传感器,以此高精度、高频率采集机组运行实时数据,同时为确保数据准确性和可靠性,采用具备抗干扰能力强、采样精度高特点的先进数据采集设备,并且按照科学采样周期来进行数据采集,针对变化较快的参数适当缩短采样周期,对于相对稳定的参数则延长采样周期。固有频率公式如下:

$$F_s = (h/60) * a$$

其中, h 为水轮机组的转速值,单位为 r/min , a 表示每转一圈的采样点数。

频谱分辨率公式如下:

$$\Delta f = F_s / N$$

其中, F_s 为固有频率,即每秒的采样数量, N 为快速傅里叶变换 FFT 中的点数。

数据传输中为把采集到的数据及时且安全地传输到数据处理中心,采用有线与无线相结合的传输方式,针对距离较近并且环境稳定的区域采用有线传输,以此保证数据传输的稳定性和实时性,而对于一些不容易进行布线的区域则利用无线通信技术来进行数据传输,还通过加密和校验机制防止数据在传输过程中出现丢失或者损坏。在数据管理方面建立起完善的数据存储系统,采用大容量的数据库对采集到的海量数据进行分类存储,同时为了方便数据的查询和调用,对数据进行详细的标注以及索引,并且制定出严格的数据备份策略,定期对数据进行备份以防止因意外情况导致数据丢失。

四、巴塘水电站状态监测与故障诊断技术应用效果

(一) 技术效果

巴塘水电站运用状态监测与故障诊断技术在技术经济社会层面成效显著,在技术效果方面该技术大幅提升水轮机组运行状态监测精度与故障诊断准确性,通过在水轮机组关键部位布置大量高精度传感器如振动温度压力传感器等,可实时全面获取机组运行参数为准确判断机组状态提供丰富数据基础,先进的数据采集与传输系统保证数据及时稳定传输,强大的数据处理与分析算法能从海量数据中精准提取故障特征提高故障早期预警能力。

(二) 经济效益

从经济效益的角度来看,状态监测与故障诊断技术应用给巴塘水电站带来了可观经济收益,因提前发现设备故障并且及时进行维修,减少了机组的非计划停机时间,提高发电小时数进而增加了发电量,直接提升了电站的发电收入。这项技术有助于实现精准化的维修工作,避免了过度维修以及盲目更换零部件的情况,降低了电站的维修成本。

(三) 社会效益

巴塘水电站状态监测与故障诊断技术应用意义重大,稳定可靠的电力供应保障当地居民日常生活及工业生产用电需求,这极大促进了当地经济的持续稳定发展,该电站作为区域重要能源供应源其稳定运行对维护地区电力系统安全稳定至关重要,同时先进技术应用展示我国水电领域技术实力和创新能力,为其他水电站提供可借鉴经验和模式推动水电行业技术进步发展。

结论:

状态监测与故障诊断技术在金沙江上游巴塘水电站水轮机组应用成效显著,后续需进一步加强对物联网大数据人工智能等新技术的研究和应用,持续完善状态监测与故障诊断技术体系,以此更好保障水轮机组安全稳定运行并为我国水电事业可持续发展作更大贡献。

[参考文献]

- [1]姜源清, 逯鹏, 李静, 等. 高水头水电站水轮机泥沙磨损特性及防护措施研究[J]. 红水河, 2025, 44(02): 15-19.
- [2]赵呈跃. 大型水电站水轮机组状态监测与故障诊断技术研究[J]. 水上安全, 2025, (05): 79-81.
- [3]谢科军, 宋善坤, 胡婷, 等. 基于 KNN 的水电站水轮机监控系统研究[J]. 粘接, 2025, 52(01): 193-196.
- [4]何冰清, 李曼. 水轮发电机组状态监测与故障诊断分析[J]. 水电站机电技术, 2024, 47(11): 22-25.
- [5]令狐克诚. 水电站水轮机组远程监测系统设计与实现[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(23): 117-121.
- [6]谭淞镁. 水电站机组状态监测与故障诊断系统应用[J]. 通信电源技术, 2020, 37(06): 111-112.
- [7]徐贤海. 基于 ADAM 的水电站水轮机状态数据监测系统[J]. 水科学与工程, 2019, (02): 19-23.
- [8]江伟新. 水轮机组继电保护以及状态监测探究[J]. 科技传播, 2014, 6(19): 212+210.