

水力脉动下抽水蓄能机组扭振特性辨识方法

田逸群 韩四保 雷文斌

(内蒙古赤峰抽水蓄能有限公司, 内蒙古 赤峰 024000)

【摘要】随着新能源的大力发展,抽水蓄能机组的安全稳定运行对电力系统的安全稳定起着至关重要的作用。水力脉动是影响机组正常工作的一个重要因素,其对扭振特性的影响不可忽视。开展水力脉动作用下抽水蓄能机组扭振特性研究,对提高机组运行可靠性、延长使用寿命及优化设计有重要意义。本文基于抽水蓄能技术的工作原理,分析了水力脉动对机组扭振稳定性的影响,针对水力脉动以及抽水蓄能机组扭振的理论基础,对扭振特性辨识方法进行了研究。

【关键词】水力脉动;抽水蓄能机组;扭振特性;辨识方法

引言:

抽水蓄能机组是现代电力系统中重要的调峰储能装置,其安全稳定运行对电力系统安全可靠、经济运行具有重要意义。水力脉动是影响机组扭振特性的一个重要因素,它对机组的性能有着不可忽视的影响。力波动会使机组轴系产生复杂的扭振响应,严重影响机组使用寿命及效率。因此,开展水力脉动作用下抽水蓄能机组扭振特性的研究,可以提高机组运行效率、保障电力系统安全。

一、抽水蓄能技术工作原理

抽水蓄能技术是一种高效储能方式,在电力系统中发挥着重要作用。其工作原理是以水的势能与动能相互转化为基础的。在低谷期间,用过多的电力将水从下水库抽到上水库储存起来,此时系统表现为水泵;而在高峰时段,储存的水被释放,通过水轮机发电,此时系统则转变为发电机。这种能量转换与存储机制既可增强电力系统调峰能力,又可提高电力系统的稳定可靠度。由于水力脉动会导致机组失稳,从而影响机组的正常运行,对扭振特性进行深入研究并准确识别是保证机组在不同工况下稳定可靠的关键。

抽水蓄能技术能够提供快速响应的备用电源,增强电力系统的稳定性和可靠性,抽水蓄能电站在应对自然灾害等突发事件时能快速启动,为电力系统恢复供电提供强有力的支撑。随着世界能源结构的转变及环保意识的提高,开发利用可再生能源已成为当今世界能源发展的一个重要方向。抽水蓄能技术是一种高效储能方式,对新能源消纳具有重要意义,例如以风能、太阳能为代表的新能源发电,其发电量受天气、时间等因素的影响,表现为间歇

性、不稳定等特点。抽水蓄能电站可有效平衡电力系统波动,在风光发电高峰时蓄能,峰值释放能量,提高系统稳定可靠的运行稳定性。

从技术角度看,抽水蓄能技术与可再生能源的结合需要解决的关键问题之一是机组扭振特性的辨识。在水力脉动环境中,机组的扭振稳定性直接关系到电站的高效运行与安全运行,因此,开展水力脉动对机组扭振稳定性的影响规律和准确识别水力脉动环境下机组扭振特性是提高机组运行性能的关键。通过理论建模与试验验证相结合的方法深入研究不同工况下机组扭振特性,并以此为基础对机组进行优化设计,确保新能源并网条件下机组高效稳定运行。例如,针对水力脉动环境下抽水蓄能机组扭振特性辨识方法的研究,可以采用先进的信号处理技术和机器学习算法对采集到的扭振数据进行分析,提取出扭振特性的关键参数,通过这些参数对机组的运行状态进行实时监控和预测,及时发现潜在的故障和风险,从而采取相应的维护措施。

二、水力脉动对机组扭振稳定性的影响

水力脉动环境对抽水蓄能机组扭振稳定性产生重要影响,直接影响机组安全高效运行。水力脉动是指水力系统中因水动力变化而产生的周期性水力脉动,在水轮机及水泵内产生交变扭矩,导致轴系扭振。例如,在大型抽水蓄能电站的运行数据中可以观察到在特定的水力脉动频率下机组的扭振响应幅度显著增加,说明水力脉动和扭振存在较强的耦合作用。当水力脉动频率接近机组固有频率时会产生共振现象,加剧扭振幅值,威胁机组稳定运行。通过构建精确的理论模型和采用先进的扭振辨识方法可以有效地预测和控制水力脉动引起的扭振问

题，从而为抽水蓄能机组的优化设计和运行提供科学依据。

三、水力脉动分析

抽水蓄能机组运行过程中不可避免地会发生水力脉动现象，其产生原因十分复杂，大致可分为自然脉动与强迫脉动。自然脉动主要由库水位变化、河道形状和水流特性等因素引起，强迫脉动主要由机组运行过程中的机械振动、阀的运行和叶片的周期性运动引起。例如，当水轮机叶片在某一转速下工作时可能会产生相对于叶片数目的脉动频率，从而产生强迫脉动现象。在对抽水蓄能机组扭振特性进行辨识时必须考虑其影响因素。通过构建相应的理论模型，如流体动力学模型和结构动力学模型可以对水力脉动进行分类和定量分析。比如，利用频谱分析技术对水力脉动信号进行分解，识别出不同频率的脉动信号。

（一）机组运行过程中水力脉动的影响

水力脉动是抽水蓄能电站运行过程中不可避免的一种自然现象，它对机组扭振稳定性有重要影响。机组运行状态在水力脉动作用下呈现周期性波动，不仅影响机组效率，还可能造成机械疲劳与结构损伤。当水力脉动频率接近机组自振频率时可能产生谐振，使机组扭振幅值增大，威胁机组稳定运行。在分析模型方面，采用流固耦合分析模型可以更准确地模拟水力脉动对机组扭振特性的影响，该模型综合考虑了水力脉动的动态特性以及机组结构的响应，能够为设计更稳定的抽水蓄能机组提供理论依据。

（二）水力脉动与扭振特性的关联分析

水力脉动是指机组在运行时，由于水力特性的非均匀性造成转子所受力的周期性变化，这一变化将直接影响到机组扭振特性，也就是轴系扭振特性。进一步分析水力脉动与扭振特性的关联可以借助于扭振特性测试方法来获取更为精确的数据。例如，通过在机组关键部位安装传感器来实时监测转轴的扭振响应，可以发现水力脉动的幅度和频率对扭振特性的影响。在水力脉动与扭振特性的变化规律研究中，建立准确的分析模型至关重要，可以采用有限元分析方法结合流体动力学和结构动力学原理构建一个综合考虑水力脉动影响的扭振分析模型，通过模型预测来对不同工况下的扭振特性进行模拟，从而为机组设计和运行提供理论依据。

四、抽水蓄能机组扭振的理论基础

（一）扭振现象的物理描述

研究水力脉动作用下抽水蓄能机组扭转振动特

性识别方法，需要对扭振现象进行物理描述并对其进行识别。扭振是指系统在周期和非周期力矩的共同作用下发生振动的现象，抽水蓄能机组的振动主要来源于机组间的转矩波动。例如水轮机轴系受水力脉动影响，转速、转矩等发生周期性变化引起轴系扭转振动，这种振动不仅会影响机组的稳定运行，还会造成机械疲劳，降低使用寿命。在实际应用中，扭振动力学模型的建立可确定扭振特征参数，如扭振频率、幅值、阻尼比等，这些参数是计算扭振响应的关键，也是设计有效的扭振抑制策略的关键。例如，通过对机组扭振频率的分析可预测机组在某一特定工况下的振动特性，进而对机组进行优化设计。

（二）扭振特性参数定义

在探讨水力脉动下抽水蓄能机组的扭振特性时，扭振特性的参数不仅为分析机组的动态响应提供了量化的基础，也是预测、评估机组寿命、安全运行的关键。扭振频率是描述扭振特性的核心参数，其变化直接关联到机组的振动幅度和能量分布。在实际应用中，通过监测扭振频率的变化可以及时发现机组潜在的故障和性能退化。例如，当扭转振动频率发生不正常的波动时，可能表明机组中的机械零件已经磨损或损坏，需要维修或更换。扭振阻尼比是反映系统耗散振动性能的另一重要参量，在设计阶段，通过对扭振阻尼比的优化可有效降低机组振动幅值，延长机组寿命。

五、扭振特性辨识方法

（一）利用水力脉动测试抽水蓄能机组轴系扭振特性的方法

水力脉动是抽水蓄能电站运行的重要参数之一，其对机组扭振特性的影响不可忽视，通过对水力脉动的精确测量与分析可以更深入地认识水力脉动对轴系扭振特性的影响机理。例如，某型号抽水蓄能机组在某一试验中测试发现，当机组水力脉动频率接近轴系固有频率时会出现明显的共振现象，引起轴系扭转振幅增大，这一结论对设计更加安全、可靠的机组有一定的参考价值。采用高精度的传感器及先进的数据采集系统是实现该方法的关键，这些装置可以捕获微小的扭转振动变化，然后转换成可以分析的数据。如采用应变片传感器对轴系进行实时监测，高速数据采集系统可将轴系扭转振动的动态变化过程记录下来。研究人员可以通过这些数据构建出更为精确的扭振特性分析模型，从而对水力脉动下的扭振特性进行深入研究。

（二）基于信号处理的辨识方法

通过对机组运行状态下的水力脉动信号进行采集，并采用先进的信号处理技术可以实现对扭振特征信息的有效提取。例如，采用快速傅里叶变换（FFT）技术可实现从时域到频域的转换，进而分析扭转振动的频率成分及幅值特征。另外，小波分析作为信号多尺度分析的工具，对非平稳信号的处理有其独特的优势，在扭振特性辨识中，小波变换能够提供时间-频率的局部化信息，这对于分析水力脉动引起的瞬态扭振现象尤为重要。如在抽水蓄能机组扭振特性试验中采用连续小波变换（CWT）对扭振信号进行分析，能够发现机组轴系扭振响应在某些频率区间呈现明显的振荡特性，为扭转振动的预报与控制提供新思路。

基于信号处理技术，可以与自适应滤波、神经网络等其他技术相结合，提高识别精度和鲁棒性，自适应滤波器能够根据输入信号的特征动态调节自身的参数，实现对噪声信号的有效提取。此外，以深度学习为代表的神经网络模型能够从海量数据中自动提取扭振信号特征，实现扭振特性的高精度预测。

（三）基于模型预测的识别方法

该方法通过构建精确的数学模型来预测机组在不同工况下的扭振响应，实现对扭振特性的有效辨识。例如，利用ARIMA等时序分析模型预测机组在特定激振力下的扭转振动特性。模型通过历史数据的训练，能够捕捉到水力脉动与扭振特性之间的动态关系并对未来状态进行预测。此外，因深度学习中的长短期记忆网络（LSTM）在处理时间序列数据方面的优势，也被广泛应用于此类预测任务中。

为了在实际应用中提高预测的准确性，可以将多种模型进行集成。比如，将ARIMA、LSTM网络、支持向量机三种模型有机地结合起来，充分发挥其各自的优势，建立混合模型，更好地把握扭转振动的复杂动力学特性，提高预报的准确性和可靠性。一般来说，需要大量的试验和模拟来验证模型的正确性，通过对比实验数据和模型预测结果评估模型的性能并对模型进行优化。另外，对预报结果进行实时监控与调整，对提高预报精度具有重要意义，通过对机组运行数据的实时采集，实现模型参数的实时更新，以适应机组运行状态的变化，实现连续、精确的扭振特性识别。

（四）基于机器学习的辨识方法

以深度学习为代表的机器学习方法可以处理海

量复杂数据，理解波动与扭转振动特性的非线性关系。如建立深度神经网络模型预测不同工况下机组扭振响应，达到实时监测扭振特性并进行故障诊断。通过卷积神经网络（CNN）提取机组扭振信号特征，识别由动力波动导致的扭振异常模式。

随着工业互联网技术的迅猛发展，设备运行过程中产生的海量数据为预测维护带来了新的机遇，通过对机组运行过程中温度、压力、振动、声波等多种参数的采集与分析，可以构建出一个全面的设备健康状况图谱。研究人员可以利用大数据分析技术发现设备操作过程中可能出现故障或性能降低的微小变化，结合支持向量机、随机森林等机器学习算法进一步提高预测精度，这类算法可以从历史数据中学习设备正常的行为模式，当发现异常行为偏离这些模式时发出警报。这样，维修人员就能在故障发生前采取相应的预防措施，减少停机时间，提高设备可靠性，提高生产效率。

六、结论

在对水力脉动下抽水蓄能机组扭振特性辨识方法的研究发现，通过精确的信号处理技术可以有效地从复杂的水力脉动信号中提取出扭振特性，为机组的稳定运行提供关键数据支持。此外，模型预测方法在辨识过程中也显示出了其强大的预测能力，通过建立精确的数学模型可以预测机组在特定水力脉动条件下的扭振响应，为预防潜在的机械故障提供理论基础。深度学习技术在处理大量数据和识别复杂模式方面表现出了巨大潜力，通过训练神经网络模型可以帮助相关人员更为准确地辨识机组的扭振特性，从而为机组优化设计与维修提供新思路。

参考文献：

- [1]马运翔, 刘晓锋, 何小锋, 彭辉, 曹扬.水力脉动下抽水蓄能机组扭振特性辨识方法[J].动力工程学报, 2024(06): 98-100.
- [2]陈志, 宋少群, 黄金富, 赖永生.抽水蓄能机组调频控制优化策略研究[J].电气应用, 2023(12): 54-58.
- [3]汪哲铖, 杨威嘉, 杨小龙, 吴沛霖, 廖溢文, 高彦明.变速抽水蓄能机组功率优先控制模式的运行稳定域分析[J].水电与抽水蓄能, 2024(01): 28-32.
- [4]凡家异.抽水蓄能机组运行稳定性研究[J].水电与抽水蓄能, 2024(01): 65-69.
- [6]胡列豪, 巩宇, 张勇军, 安禹铮, 蒋崇颖, 廖美英.考虑声-振模态结合的抽水蓄能机组轴承故障诊断[J].电力系统保护与控制, 2024(11): 32-35.