

500kV高压并联电抗器状态监测与故障预警方法研究

艾 辉

雅砻江流域水电开发有限公司 四川 成都 610051

摘 要：500kV高压并联电抗器在电力系统中作用关键。本文深入剖析其故障机理，涵盖基本结构、常见故障类型成因及发展特征。详细阐述状态监测技术，包括电气、机械、热和油中气体监测。探讨基于阈值比较、趋势分析、模式识别及多源信息融合的故障预警方法。介绍状态监测与故障预警系统的分层架构设计，以及硬件选型集成、软件功能模块划分和系统通信与数据安全保障措施，为电抗器安全运行提供支持。

关键词：500kV高压并联电抗器；故障机理；状态监测技术；故障预警方法；系统设计

引言：在电力系统中，500kV高压并联电抗器对于限制短路电流、补偿线路电容等意义重大。其运行状态直接影响电网的稳定性与安全性。然而，受电气、机械、热等多种因素影响，电抗器易出现各类故障。若不能及时发现并处理，将引发严重后果。因此，深入研究500kV高压并联电抗器的状态监测与故障预警方法，准确掌握其运行状态，提前发现潜在故障，对保障电力系统可靠运行十分必要。

1 500kV 高压并联电抗器故障机理分析

1.1 电抗器基本结构与工作原理

500kV高压并联电抗器主要由铁芯、绕组以及油箱等关键部分构成。铁芯作为磁路的核心，为磁通提供闭合路径，通常采用高导磁率的硅钢片叠压而成，以减少磁滞损耗和涡流损耗。绕组则由绝缘导线绕制而成，是电抗器实现电磁感应功能的关键部件，通过合理的设计和绕制方式，确保电抗器具有所需的电感值^[1]。油箱不仅为电抗器的内部结构提供物理支撑和保护，还充当冷却介质（如绝缘油）的容器，保障电抗器在运行过程中的散热需求。电抗器的工作原理基于电磁感应定律。当交流电流通过绕组时，会在铁芯中产生交变磁通，该磁通又会在绕组中感应出电动势。通过精心设计磁路，控制磁通的分布和大小，使电抗器呈现出特定的电感特性，从而在电力系统中起到限制短路电流、补偿线路电容等作用。

1.2 常见故障类型及成因

电气故障方面，绕组匝间短路是较为常见的问题。这往往是由于绝缘材料在长期运行过程中，受到电场、热场等多重因素作用，逐渐老化变质，导致绝缘性能下降，最终引发匝间绝缘击穿。绝缘老化则是电气、热等多种因素长期综合作用的结果，使得绝缘材料的物理和化学性质发生改变，失去原有的绝缘能力。机械故障中，铁芯松动多因电抗器在运行过程中受到电磁力的反

复作用，以及制造安装时铁芯紧固不牢所致。结构件疲劳则是由于机械应力长期反复作用，超过结构件的疲劳极限，引发裂纹甚至断裂。机械应力、振动等因素会加速这些故障的发生和发展。热故障方面，局部过热可能是由于绕组内部存在局部短路，导致电流分布不均，局部电流过大产生过多热量。油温异常则与热传导、散热机制密切相关，如冷却系统故障、油路堵塞等，都会影响热量的散发，使油温升高。

1.3 故障发展过程与特征

故障从初始阶段到严重阶段是一个逐步演变的过程。在初始阶段，故障特征可能较为微弱，如电气参数出现轻微异常、机械振动幅度略有增大、局部温度稍有升高等。随着故障发展，这些特征会逐渐明显，电气参数偏差增大，机械振动加剧，局部过热区域扩大，油温持续升高。不同故障类型具有不同的特征表现。通过分析这些特征变化，能够总结出故障特征与故障类型之间的对应关系，为后续开展状态监测和故障预警工作提供坚实的理论支撑，有助于及时发现潜在故障，采取有效措施避免故障进一步恶化。

2 500kV 高压并联电抗器状态监测技术

2.1 电气参数监测

电压与电流作为反映电抗器运行状态的关键电气参数，对其进行精准监测至关重要。在传感器选型方面，电压监测通常选用高精度、高稳定性的电压互感器，电流监测则采用性能可靠的电流互感器。安装时，电压互感器需并联在电抗器相关线路上，电流互感器要串联接入，确保准确获取电压、电流信号。电压、电流波形变化与电抗器运行状态紧密相连，正常状态下波形规整，若出现畸变、幅值异常等情况，可能预示着电抗器存在匝间短路、绝缘损坏等故障隐患。绝缘参数监测是保障电抗器安全运行的重要环节。绝缘电阻监测基于欧姆定

律,通过施加直流电压测量绝缘电阻值,反映绝缘材料的绝缘性能^[2]。介质损耗因数监测则利用交流电压下绝缘材料的损耗特性,检测介质损耗因数大小,判断绝缘是否存在老化、受潮等问题。当绝缘参数出现异常,如绝缘电阻降低、介质损耗因数增大,往往意味着电抗器绝缘系统出现问题,可能引发电气故障。

2.2 机械状态监测

电抗器运行过程中,电磁力、机械振动等多种因素会导致设备产生振动。振动监测中,振动传感器布置需遵循一定原则,一般安装在电抗器油箱壁、铁芯等关键部位,以全面获取振动信息,传感器安装间距不超过1.5m。监测方法包括连续监测和定期巡检等,连续监测采样频率不低于100Hz。对振动信号进行特征提取与分析,可运用时域分析、频域分析等技术,识别振动信号中的异常成分,判断电抗器是否存在铁芯松动、绕组变形等机械故障,振动幅值超过20 μ m时需发出异常提示。噪声与电抗器内部机械状态存在内在联系。电抗器内部机械部件的振动、摩擦等会产生噪声。噪声监测选用高灵敏度的噪声测量仪器,测量范围为30dB-120dB,通过合理布置监测点获取噪声信号。分析噪声频谱特征,不同故障类型会产生特定频率的噪声成分,利用这一特性可实现故障诊断,为电抗器机械状态评估提供依据。

2.3 热状态监测

油温是反映电抗器热状态的重要指标。油温传感器通常安装在电抗器油箱顶部、底部等关键位置,采用接触式测量方法获取油温数据。油温变化与电抗器负载、散热条件密切相关,负载增加或散热不良会导致油温升高。研究油温异常预警指标,设定合理的油温阈值,当油温超过阈值时及时发出预警,防止电抗器因过热损坏。红外测温技术基于物体辐射红外线的原理,具有非接触、快速、直观等优势。红外热像仪可实时监测电抗器表面温度分布,生成热像图。通过分析热点温度,若出现局部温度异常升高,可能预示着电抗器内部存在匝间短路、局部放电等故障,为故障早期发现提供有效手段。

2.4 油中气体监测

油中气体产生源于电抗器内部绝缘材料在电、热等作用下发生的化学反应。气相色谱分析技术通过将油样中的气体分离并检测各成分含量,实现对油中气体成分和含量的精确检测。不同故障类型下油中特征气体产生规律不同,如氢气、甲烷、乙炔等气体在匝间短路、绝缘老化等故障时会大量产生,建立特征气体与故障类型的对应关系,有助于准确判断电抗器故障类型。

3 500kV 高压并联电抗器故障预警方法

3.1 基于阈值比较的预警方法

确定各监测参数的预警阈值需结合电抗器正常运行工况范围与故障演化特征,整合长期积累的历史运行数据与行业专家经验,针对电气、机械、热及油中气体等各类监测参数,划定合理预警边界。电气参数阈值需匹配设备额定运行参数,兼顾电压、电流等参数的波动范围;机械参数阈值围绕振动、位移等指标,贴合设备结构力学特性;热参数阈值结合散热系统性能,适配不同工况下的温度变化规律;油中气体参数阈值依据绝缘介质分解特性,对应不同故障类型的气体生成规律^[3]。预警规则制定需围绕参数阈值触发逻辑,当单一监测参数超出设定阈值时,自动触发对应等级预警信号,通过分析不同预警信号的组合形式,精准判断故障所属类型与发展严重程度,为后续处置提供明确方向。

3.2 基于趋势分析的预警方法

数据趋势分析技术是捕捉故障早期征兆的关键手段,时间序列分析通过梳理监测参数随时间的动态变化轨迹,挖掘参数变化的内在规律,识别异常波动趋势;回归分析通过拟合参数变化曲线,预判参数未来变化走向,提前捕捉潜在故障隐患。趋势预警指标构建需基于监测参数的变化规律,设计变化率、加速度等核心指标,变化率指标反映参数单位时间内的变化幅度,加速度指标体现参数变化速率的波动情况,通过设定指标合理阈值,当趋势预警指标超出限值时,及时发出预警信号,实现故障早期预警,避免故障进一步恶化。

3.3 基于模式识别的预警方法

故障特征模式提取需借助专业信号处理技术,小波分析可实现监测信号的多尺度分解,分离有效信号与干扰信号,精准提取故障特征分量;傅里叶变换能够将时域监测信号转换为频域信号,识别故障相关的特征频率,通过系统梳理各类故障对应的特征信号,构建完善的故障特征模式库,为后续识别提供数据支撑。模式识别算法应用需结合电抗器故障特征,支持向量机凭借较强的小样本学习能力,可实现故障特征的精准分类与识别;神经网络依托多层节点映射关系,模拟故障特征的复杂变化规律,通过样本训练优化模型参数,提升故障特征识别精度,进而实现故障的精准预警。

3.4 多源信息融合预警方法

信息融合原理以多源数据互补性为核心,整合不同类型监测信息的优势,弥补单一参数监测的局限性,提升预警准确性。信息融合架构涵盖数据层、特征层与决策层,数据层实现各类监测数据的初步整合与预处理,剔除冗余信息与干扰数据;特征层对预处理后的数据进

行特征提取,强化故障相关特征;决策层结合各层级特征信息,通过融合算法实现综合判断。多源信息融合预警模型构建需整合电气、机械、热及油中气体等多维度监测信息,设计适配的融合算法,将不同类型监测数据进行有机结合,构建全面、系统的综合预警模型,有效规避单一参数预警的片面性,提升故障预警的准确性与可靠性。

4 状态监测与故障预警系统的设计与实现

4.1 系统总体架构设计

状态监测与故障预警系统采用分层架构设计,涵盖数据采集层、数据传输层、数据处理层和用户界面层。数据采集层作为系统基础,负责全面收集电抗器各类运行数据,为后续分析提供原始信息。数据传输层搭建起数据采集层与数据处理层之间的桥梁,保障数据准确、及时地传递。数据处理层是系统核心,对采集到的数据进行深度挖掘与分析,实现状态监测与故障预警功能。用户界面层则为用户提供直观、便捷的操作与展示平台,方便用户获取系统信息。各层功能紧密关联又相互独立。数据采集层为数据传输层提供数据来源,数据传输层确保数据处理层能获取完整数据,数据处理层分析结果通过用户界面层呈现给用户^[4]。这种分层设计有助于提高系统运行效率,降低各层间耦合度,同时保障数据在传输过程中的安全性。

4.2 硬件系统设计

数据采集设备选型需严格依据监测参数要求。针对不同电气、机械、热等参数,挑选高精度、高可靠性的传感器,确保能准确捕捉电抗器运行状态变化。数据采集卡要具备高速采集和稳定传输能力,以满足大量数据实时采集需求。硬件系统集成注重连接方式与布局设计。合理规划传感器与数据采集卡的连接线路,减少信号干扰,保证数据采集准确性。优化硬件设备布局,考虑散热、电磁兼容等因素,提升系统整体稳定性。

4.3 软件系统设计

软件功能模块划分遵循功能明确、职责清晰原则,划分为数据管理、状态监测、故障预警、用户界面等模块。数据管理模块负责数据存储、检索与维护;状态监测模块实时分析数据,判断电抗器运行状态;故障预

警模块依据分析结果发出预警信号;用户界面模块提供友好交互界面。各功能模块设计与实现注重细节。数据管理模块采用高效数据库结构,确保数据快速存储与读取。状态监测模块运用先进算法对数据进行实时处理,准确反映电抗器状态。故障预警模块结合多种预警方法,提高预警准确性。用户界面模块设计简洁直观,方便用户操作。

4.4 系统通信与数据安全

通信协议选择综合考虑系统需求与工业环境特点。Modbus、Profibus等常用工业通信协议各有优势,根据系统数据传输量、实时性等要求,挑选最适合的协议,保障数据稳定传输。数据安全保障措施针对系统面临的数据泄露、篡改等威胁制定。采用数据加密技术对传输和存储的数据进行加密处理,防止数据被非法获取^[5]。实施访问控制策略,限制不同用户对系统数据的访问权限,确保系统数据安全性和完整性。

结束语

通过对500kV高压并联电抗器故障机理的深入剖析,全面阐述了状态监测技术与故障预警方法,并完成了状态监测与故障预警系统的设计与实现。该系统综合运用多种监测技术和预警方法,能有效获取电抗器运行状态信息,及时发现潜在故障隐患,为运维人员提供准确决策依据,有助于提高电抗器运行的可靠性和安全性,保障电力系统的稳定运行,在电力设备运维领域具有重要应用价值。

参考文献

- [1]高树国,汲胜昌,孟令明,等.基于在线监测系统与声振特征预测模型的高压并联电抗器运行状态评估方法[J].电工技术学报,2022,37(9):2179-2189.
- [2]韩亚军.高压并联电抗器的振动测试与故障研究[J].石化技术,2025,32(7):433-434.
- [3]乔小冬,韩铎.高压并联电抗器带电检测异常分析[J].内蒙古电力技术,2021,39(5):84-88.
- [4]肖佳朋,曾香平,杨洋,等.特高压并联电抗器油色谱异常故障分析和运维建议[J].变压器,2025,62(2):58-65.
- [5]杨帆,张相杰,王鹏博,等.特高压并联电抗器铁芯振动及噪声特征研究[J].高电压技术,2024,50(2):751-762.