

Research on application of condition monitoring and fault diagnosis technology for high voltage electrical equipment

Yuyun Chen

Shenzhen ShenDian Power Supply New Energy Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518102, China

Abstract

The safe and stable operation of high-voltage electrical equipment, a core component of power systems, is crucial for ensuring reliable power supply. With the continuous expansion of industrial production scale and increasing complexity of power systems, research on condition monitoring and fault diagnosis of high-voltage electrical equipment has gained significant attention. Traditional maintenance models primarily rely on periodic repairs, which are time-consuming, labor-intensive, and prone to missing potential hazards, thereby increasing the risk of sudden equipment failures. Therefore, developing and applying advanced condition monitoring and fault diagnosis technologies can enable real-time monitoring of equipment status, facilitate early detection of potential faults, and play a vital role in reducing equipment failure rates, improving operational efficiency, and extending service life.

Keywords

high-voltage electrical; equipment condition monitoring; fault diagnosis; technology application

高压电气设备状态监测与故障诊断技术的应用研究

陈虞云

深圳市深电供电新能源有限公司, 中国·广东 深圳 518102

摘要

电力系统核心部件的高压用电设备的安全稳定运行, 是保证供电可靠性的重要保证。随着工业生产规模的不断扩大, 电力系统的复杂程度不断提高, 对高压电气设备进行状态监测和故障诊断的研究日益受到重视。传统的设备维修模式以定期维修为主, 既费时又费力, 且不易发现隐患, 增加了设备突发故障的风险。因此, 研究并应用先进的状态监测与故障诊断技术, 可以对设备运行状态进行实时监测, 及早发现潜在故障, 对降低设备故障率、提高设备运行效率、延长设备使用寿命具有重要意义。

关键词

高压电气; 设备状态监测; 故障诊断; 技术应用

1 引言

高压电气设备状态监测和故障诊断技术是一门交叉学科, 涉及到电气工程, 信号处理, 自动控制, 计算机等多个领域。状态监测是指安装于设备上的多种传感器, 实时获取设备运行状态下的温度、压力、振动、电流、电压等物理量及化学参数, 从而实时感知设备状态。随着机器学习、深度学习等人工智能技术的不断发展, 将为高压电气设备状态监测与故障诊断提供更强有力的技术支撑, 提高故障诊断的精度与效率, 也是当前相关行业的热议课题。

2 高压电气设备典型故障机理与特征分析

2.1 绝缘故障

在高压电气装备中, 绝缘故障是最为常见的一种故障, 其原因主要有绝缘材料老化、受潮及局部放大等。如油浸变压器, 它的绝缘系统是由变压器油和绝缘纸组成的, 在长时间的运行过程中, 由于温度、电场、湿度等因素的作用, 绝缘纸会发生纤维素降解, 生成呋喃化合物, 变压器油也会被氧化成酸、醛等杂质, 从而降低绝缘性能。当绝缘强度低于工作电场强度时, 易发生局部放电, 加速绝缘劣化, 最终导致绝缘破坏^[1]。从特征上看, 在绝缘故障过程中, 油中溶解气体成分发生变化(如乙炔、氢气等), 局部放电增加, 绝缘电阻降低, 是故障诊断的关键。

2.2 机械故障

断路器等具有机械传动结构的设备容易出现机械故障, 其主要表现为部件磨损、卡涩、紧固螺栓松动等。如高压断路器的操作机构(如弹簧机构、液压机构等)发生磨损,

【作者简介】陈虞云(1983-), 男, 中国广西灵川人, 本科, 助理工程师, 从事电气设备检测研究。

将造成分合闸时间过长和操作功不足,甚至造成拒动或误动事故。在GIS组合电器中,由于盆式绝缘子发生位移和导线联接松动等机械缺陷,会引起局部接触电阻的增加,引起局部过热,从而影响设备的绝缘性能。机械故障是一种典型的机械故障特征,如振动信号异常、运行特征参数偏离标准值、声信号突变等。

2.3 过热故障

过热故障主要是由于设备的导电回路接触不良和涡流损耗过大而引起的,常见于变压器套管,GIS的母线连接处,断路器触头等部位^[2]。当设备的导电回路接触电阻超标时,电流流过时产生焦耳热,引起局部温升,如果长时间过热,金属导线会退火,接触电阻进一步增加,形成“过热-电阻增加-更过热”的恶性循环,最终导致触头熔焊和绝缘烧毁等严重故障。过热故障主要表现为设备局部温度异常升高且温度分布不均匀,利用红外热像可视化地捕捉该特征,为故障诊断提供可视化依据。

3 高压电气设备状态监测技术体系设计

3.1 多源数据采集技术

多源数据获取是状态监测的基础,需要综合考虑设备类型和故障特征,建立涵盖电-热-声-化多维监测数据体系。在电气参数监控方面,利用高精度的电流互感器和电压互感器对设备的运行电流和电压进行采集,并利用超高频、特高频等局部放电监测设备对局部放电信号进行采集,采样速率不小于100 MS/s,以保证微弱放电脉冲的捕获^[3]。针对油浸变压器的温度监控,将光纤光栅温度传感技术应用于绕组内部,实现了对绕组热点温度的实时监控,其测量精度达到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$;对于地理信息系统设备,利用红外热成像技术定期巡检,结合内置无线温度传感器,实现 -40°C - 150°C 的关键节点温度连续监测。在油浸装置中,采用油中溶解性气体的在线监测装置,对油中的特征气体如氢、甲烷、乙烷、乙炔等进行分析,检出下限为 $0.1\mu\text{L/L}$;利用SF₆气体浓度和湿度的在线监测装置,对SF₆气体绝缘装置中的气体泄漏和纯度的变化进行实时监控。在机械特性监测方面,利用压电加速度传感器等振动传感器,对断路器操纵机构的振动和变压器本体的振动信号进行采集,采样频率在2kHz-5kHz之间,采用激光位移传感器对GIS导线位移进行0.01 mm的测量。

3.2 数据预处理技术

为提高数据质量,需要对采集到的数据进行预处理,可利用 3σ 准则对数据进行清洗,剔除离群点,利用线性内插的方法对缺失数据进行修复,以保证数据的完整性。其次是信号去噪,采用小波阈值去噪的方法去除局部放大信号中的高频噪声,同时保持放电脉冲的特征。采用自适应滤波的方法消除电网频率的干扰,突出了与机械故障有关的振动成分。在此基础上,对多维数据(如温度、局部放电率、瓦斯

浓度)进行归一化处理,形成标准化的数据集,为后续特征提取和故障诊断奠定基础。

3.3 特征提取技术

特征提取是连接数据获取和故障诊断之间的一个重要环节,应以绝缘故障为研究对象,针对绝缘故障,通过提取油中溶解气体的特征气体比例(乙炔/乙烯、氢/甲烷)、产气量等特征参数,实现对绝缘故障特征的提取。本项目针对机械故障,通过对振动信号的时域特征(峰值、均方根值、脉冲指数等)和频域特性(特征频率幅值、频谱重心等)进行特征提取,提取故障特征量,提取故障特征。针对过热故障,通过提取过热故障的热点温度、温度梯度、温升速率等特征信息,结合图像灰度特性,构建过热故障特征矩阵。采用基于特征提取的故障诊断方法,能够有效地降低数据维数,提高故障诊断效率。

4 高压电气设备故障诊断核心技术应用

4.1 油中溶解气体分析(DGA)技术

油中溶解气体分析是油浸式变压器、电抗器等设备绝缘故障诊断的核心技术,其原理是根据设备绝缘老化时产生的特征气体,对故障类型和程度进行判别。应用“三比值法”与改进的电协研方法相结合,建立油中乙炔含量大于 $5\mu\text{L/L}$ 、乙炔/乙烯含量大于0.5的故障诊断模型。在甲烷/氢小于0.1和总碳氢化合物含量大于 $100\mu\text{L/L}$ 的情况下,判断为局部过热(温度 $>700^{\circ}\text{C}$)。在乙烷/甲烷 >1 和氢含量小于 $100\mu\text{L/L}$ 的情况下,判断为低温过热失效(温度 $<300^{\circ}\text{C}$)。为提高故障诊断的准确性,必须综合考虑设备的使用年限、负荷变化和历史维修资料。以某220 kV油浸变压器为例,在运行12年后,对油中溶解气体进行监测,发现其中乙炔含量高达 $8.2\mu\text{L/L}$,乙炔/乙烯比0.65,结合近期变压器负荷稳定情况,诊断为绕组绝缘局部电弧放电,停电检修后发现匝间绝缘破损,证明DGA工艺的有效性。

4.2 局部放电监测技术

局放监测技术是一种适用于变压器、地理信息系统和电缆等设备绝缘缺陷的检测技术。离线监控主要是工频耐压测试与局放测试相结合的方式,利用调压器对其施加额定电压,利用超高频传感器对放电信号进行采集,适合设备停电检修的场合;在线监测是指在设备运行过程中安装固定传感器,对设备局部放电信号进行实时监控,以达到对设备运行状态进行故障预警的目的。超高频(UHF)传感器可有效捕获GIS内部局放产生的超高频电磁波(300MHz-3GHz),抗干扰能力强。以某500 kV GIS装置为例,在对该装置进行在线监测时,发现该装置B相母线筒体局部放电持续上升,最高可达2000 pC,经特高频信号定位后,发现该缺陷在盆式绝缘子与导线的连接处,经解体检查,发现绝缘子表面有金属杂质,经排除杂质后,其放电量已低于50pC,从而避免绝缘的破坏。

4.3 红外热成像技术

红外热像技术通过对设备表面的红外辐射进行探测,产生温度场分布,可以实现对设备过热故障的直接识别,在变压器套管、断路器触头、母线接头等位置的监控中得到广泛的应用。应用时要遵循“同条件对照”的原则,也就是选择同负荷、同环境温度的同类设备做比较,如果某一设备的局部温度比同类设备高 10°C 以上,或者相对温差大于20%,就可以判断为过热缺陷。高压断路器触头的正常工作温度应在 70°C 以下,如果监测结果显示 95°C 以上,且相对温差在25%以上,则应对触头的接触状况进行进一步检查。在220 kV变电站巡视过程中,采用红外热像技术检测到110 kV隔离开关接头处的温度高达 102°C ,远远超过标准值,停电检查时发现连接处的螺栓松动、界面氧化,处理后温度下降到 62°C ,有效地消除了过热隐患。

4.4 振动监测技术

振动监测技术主要应用于断路器执行器和变压器冷却系统等设备的机械故障诊断。以高压弹簧操动机构断路器为例,正常合闸振动信号主要集中于500Hz-800 Hz,当弹簧疲劳发生时,振动信号主频率将发生偏移至300-500 Hz,峰值振幅增加20%以上。在实际运行中,将振动传感器安装在机构壳体上,对分合闸过程的振动信号进行采集,并将历史数据与规范图谱进行对比,实现对断路器故障的诊断。对某变电所110 kV断路器进行振动监测时,发现其开断振动频率降低至350 Hz,幅值较历史值增加25%,诊断为操作机构弹簧疲劳,更换弹簧后振动信号恢复正常,避免断路器拒动。

5 工程案例

5.1 案例背景

某220 kV变电站担负着区内工业用电和居民用电,主要设备有两台120 MVA油浸变压器、4套220 kV GIS组合电器和6台110 kV高压断路器,运行时间8~12年。针对该变电站近年来频繁发生设备异常报警现象,传统定期检修模式很难准确定位故障根源,项目拟将高压电气设备状态监测和故障诊断技术体系引入到电力设备状态监测和故障诊断系统中,建立一套覆盖整个变电站的在线监测体系,对变压器、GIS、断路器等关键设备进行多维监控。

5.2 监测方案设计

项目针对变压器,配置油中溶解气体在线监测装置(检测成分为 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、光纤光栅绕组测温系统(测点布置在高低压绕组热点上)、局放在线监测装置(装在油箱侧壁上的超高频传感器)。在GIS设备上安装特高频局放(1个间隔1个)和SF₆(气体浓度和湿度在线监测设备)。在断路器上安装振动传感器(安装在操作器外

壳上),红外温度传感器(监控触点温度)。在此基础上,搭建多源监测数据融合平台,以1分钟采样间隔,200 MS/s的采样速率,实现多源数据的实时汇聚、存储和分析。

5.3 故障诊断与处理过程

经过三个月的监测,发现#1主变油中乙炔含量由 $0.5\mu\text{L/L}$ 上升到 $6.8\mu\text{L/L}$,乙炔/乙烯比0.72,局部放电由50 pC上升到1800 pC,线圈热点温度稳定在 65°C (非超温)。为了进一步确定故障位置,利用超声局放技术对3~4号绕组进行了定位。停电检修时,对变压器进行了拆卸,发现此处的绝缘纸出现了破损,并有碳化的迹象,更换了破损的绝缘纸,重新进行了干燥,使油中的乙炔含量降低到了 $0.3\mu\text{L/L}$,局部放电也恢复到了45 pC。

另外,在GIS设备监测过程中,发现220 kV B相GIS母线管局部放异常,特高频传感器检测到了1500 pC的放电信号,经延时定位,确定故障位置在盆式绝缘子上。经检查发现有金属微粒附着在绝缘子表面,经清除微粒、清理绝缘后,信号消失。断路器监测时发现,110kV变电站#2断路器分闸时,其振动频率主要频移至320 Hz,振幅增加30%,诊断为操作机构弹簧老化,更换弹簧后,振动信号恢复正常。

5.4 实施效果

该技术系统投入运行一年多来,已查出8个设备隐患,包括2个重大缺陷(#1主变绝缘故障、GIS绝缘子金属颗粒故障),并在事故扩大之前进行了处理,无因设备故障而停电。通过对运行前和运行后的数据进行对比,发现变电站设备失效概率由2023年的8%下降到2024年的1.2%,维修费用下降30%(含过度维修),设备无故障运行周期由180天延长到320天,显著提高电网供电可靠性和经济效益。

6 结语

综上,基于故障诊断技术的高压电气设备故障诊断方法,不仅可以有效地提高高压电气设备的运行可靠性,而且可以保证电力系统的安全稳定运行。随着科技的发展,特别是人工智能与大数据技术的深度融合,高压电气设备的状态监测与故障诊断将向智能化、精准化方向发展。可为电力行业数字化转型与智能化升级提供关键技术支撑,并对其它工业领域装备智能化管理具有借鉴意义,促进工业生产向更高效率、更安全、更可持续的方向发展。

参考文献

- [1] 徐明.变电站高压电气试验设备故障运行状态检测分析[J].电力设备管理,2024,(24):204-206.
- [2] 何瀚,郭亨.基于红外图像技术的变电站高压电气设备绝缘自动监测[J].电工技术,2024,(19):184-185+190.
- [3] 孙有德.电气设备在线监测及状态检修技术研究[J].电气时代,2022,(04):34-36.