

高压开关柜的故障诊断技术浅析

徐立力 梅建平 芮绍伟

摘要: 本文对高压开关柜的故障诊断技术进行了深入探讨。首先分析了高压开关柜常见的故障类型及其成因,包括机械故障、电气故障、热故障以及环境因素引发的故障。接着详细阐述了高压开关柜故障诊断技术的要点,涵盖基于振动信号的诊断方法、基于局部放电检测的技术、基于红外热成像的故障诊断以及基于多传感器融合的智能诊断。通过研究这些故障诊断技术,旨在为提高高压开关柜运行的可靠性和安全性提供理论支持和实践指导。

关键词: 高压开关柜; 故障诊断; 振动信号; 局部放电; 红外热成像; 多传感器融合

引言

高压开关柜作为电力系统中的重要设备,承担着控制和保护电路的关键任务。其运行的稳定性和可靠性直接关系到整个电力系统的安全。然而,由于高压开关柜长期处于复杂的运行环境中,受到多种因素的影响,容易发生各种故障。一旦出现故障,不仅会导致设备损坏,还可能引发停电事故,给社会生产和人民生活带来严重影响。因此,对高压开关柜进行及时、准确的故障诊断具有重要的现实意义。本文将围绕高压开关柜的常见故障类型及成因,探讨其故障诊断技术要点。(见图1)

一、高压开关柜常见故障类型及成因分析

1. 机械故障

高压开关柜机械故障是影响其正常运行的关键因素。操作机构作为实现开关分合闸动作的核心部件,长期频繁操作下,内部零部件易出现磨损。比如分合闸线圈的机械传动结构,在不断动作过程中,齿轮间的啮合面会逐渐磨损,导致齿轮间隙增大,传动精度下降,可能出现分合闸不到位或动作迟缓现象。传动部件同样面临诸

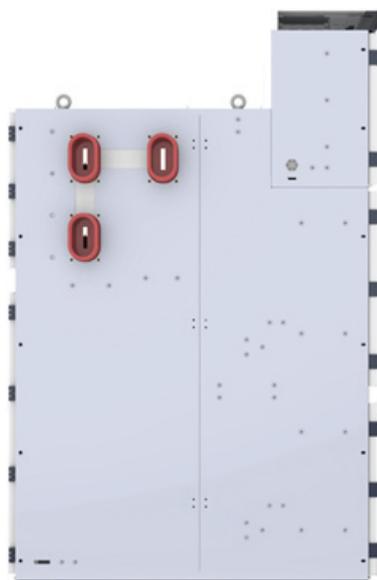


图1 高枝开关柜结构

多问题,连接螺栓可能因长期振动而松动,使得传动链条或连杆的连接不再稳固,在操作时产生晃动,影响动作的同步性和准确性。此外,一些关键部位的销轴可能因受力不均或润滑不足而发生变形甚至断裂,一旦出现这种情况,开关柜将无法正常分合闸,严重威胁电力系统的稳定运行。而且,若开关柜安装时地基不平或固定不牢,运行中产生的振动会加剧机械部件的损坏,进一步增加机械故障发生的概率。

2. 电气故障

高压开关柜电气故障犹如隐藏在电力系统中的“暗礁”,随时可能引发严重事故。绝缘损坏是常见电气故障之一,绝缘材料在长期运行中,受电场、热等因素作用会逐渐老化,其绝缘性能大幅下降。例如,开关柜内的母线绝缘套管,在持续高电压和高温环境下,绝缘层可能出现龟裂、剥落,导致绝缘击穿,引发短路故障。导

作者简介:

1. 徐立力(1986.02——)男,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事电气自动化、电气设备制造方面的研究工作;
2. 梅建平(1983.01——)男,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事电气自动化、电气设备制造方面的研究工作;
3. 芮绍伟(1989.09——)男,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事中低压电气设备研发、制造和技术服务方面的研究工作。

电回路接触不良也是不容忽视的问题，触头在频繁操作后，接触面会因氧化、磨损而变得粗糙，接触电阻增大。当电流通过时，接触部位会产生大量热量，加速触头烧蚀，形成恶性循环。此外，过电压也是电气故障的诱因，雷电冲击或系统操作过电压可能瞬间击穿绝缘薄弱环节，损坏设备。同时，若开关柜内电缆接头制作工艺不佳，存在虚接、压接不紧等情况，也会在运行中发热，引发绝缘损坏，甚至导致火灾，严重威胁电力系统的安全稳定运行。

3. 热故障

在电流通过导体时，导体电阻会使电能转化为热能，若导体电阻异常增大，发热量便会显著增多。比如，开关柜内的母线连接处，因长期运行可能出现氧化、松动，接触电阻大幅上升，电流通过时该部位温度急剧升高。散热系统若出现问题，也会加剧热故障的发生。通风口被灰尘、杂物堵塞，散热风扇故障停转，都会使开关柜内部热量无法及时散发出去，导致柜内温度持续攀升。此外，过载运行是引发热故障的常见原因，当实际负荷超过开关柜的额定容量，导体中电流增大，产生的热量远超正常水平。长时间过载会使绝缘材料加速老化，降低其机械强度和绝缘性能，还可能导致触头熔焊、电缆绝缘损坏等严重后果，不仅影响开关柜自身的使用寿命，更会对整个电力系统的安全稳定运行构成威胁。

4. 环境因素引发的故障

高压开关柜运行环境复杂多变，环境因素引发的故障不容小觑，温度方面，高温环境会加速开关柜内绝缘材料的老化进程，使其电气性能下降，绝缘强度降低，增加短路和击穿风险；低温则可能导致设备内部润滑剂凝固，操作机构动作变得迟缓、卡涩，影响开关柜的正常分合闸操作。湿度影响显著，潮湿空气易使开关柜内金属部件生锈腐蚀，降低其机械强度和导电性能，同时还会使绝缘材料受潮，表面形成导电水膜，引发漏电甚至短路故障。灰尘与污秽也是“元凶”，它们会附着在开关柜表面和内部元件上，阻碍散热，使设备温度升高，还会在绝缘子表面堆积，降低绝缘子的闪络电压，在潮湿天气下极易引发闪络事故。此外，盐雾环境对沿海地区的开关柜危害极大，盐雾中的氯离子会腐蚀金属部件，破坏绝缘，严重影响开关柜的安全稳定运行。

二、高压开关柜的故障诊断技术要点

1. 基于振动信号的诊断方法

基于振动信号的诊断方法在高压开关柜故障检测中有着独特价值，高压开关柜的操作机构和传动部件在运

行时会因机械运动产生振动信号，这些信号蕴含着设备状态的关键信息。当开关柜处于正常状态时，其振动信号具有相对稳定的频率、幅值和相位特征，这些特征反映了各部件在正常工况下的协同运动规律。

然而，一旦出现故障，振动信号的特征便会发生改变。例如，操作机构卡涩时，部件间的摩擦力增大，运动受阻，会导致振动信号的频率成分发生变化，出现异常的高频分量，同时幅值也可能增大。传动部件松动时，部件间的连接不再紧密，运动过程中会产生冲击和振动，使振动信号的时域波形出现明显的脉冲特征，且频谱图中会出现与松动部件固有频率相关的谱峰。

为了准确提取振动信号中的故障特征，需要采用多种信号处理技术。时域分析可以直观地观察振动信号的幅值变化和波形特征；频域分析则能揭示信号的频率分布情况，帮助识别故障对应的频率成分。通过对大量正常和故障状态下振动信号的分析 and 建模，建立故障特征库，再结合模式识别算法，如支持向量机、神经网络等，就能实现对高压开关柜机械故障的准确诊断，为设备的维护和检修提供有力依据。

2. 基于局部放电检测的技术

基于局部放电检测的技术是高压开关柜绝缘状态监测与故障诊断的关键手段，高压开关柜在长期运行过程中，绝缘材料可能因电场、热、机械应力等因素出现缺陷，当电场强度超过局部区域的绝缘耐受能力时，便会发生局部放电。局部放电虽未形成贯穿性击穿，但会持续侵蚀绝缘，最终导致绝缘失效。

局部放电会产生多种物理现象，如电磁波、超声波、脉冲电流等，这些现象为检测提供了信号源。特高频检测法聚焦于局部放电产生的特高频电磁波，其频率范围通常在300MHz-3GHz，该频段信号受外界干扰小，能有效穿透开关柜壳体，通过在柜内布置特高频传感器，可捕捉到局部放电产生的电磁波信号，进而分析放电的强度、频次等特征，判断绝缘缺陷的类型和严重程度。

超声波检测法利用局部放电引发的超声波信号，超声波传感器将声信号转换为电信号，通过对电信号的分析，可定位局部放电的位置。脉冲电流法则是通过检测局部放电在接地线上产生的脉冲电流信号，该方法灵敏度高，能准确测量局部放电的视在放电量。将多种检测方法相结合，综合分析不同信号特征，可更全面、准确地评估高压开关柜的绝缘状况，提前发现潜在的绝缘故障，为设备的可靠运行提供保障，避免因绝缘故障引发更严重的电力系统事故。

3. 基于红外热成像的故障诊断

基于红外热成像的故障诊断为高压开关柜运行维护提供了直观且高效的技术手段。高压开关柜在运行过程中，若内部存在故障隐患，往往伴随着局部温度的异常变化。当导电回路接触不良时，接触电阻增大，电流通过时在该处会产生额外的焦耳热，导致局部温度升高；绝缘材料老化、破损或受潮时，其绝缘性能下降，可能引发局部漏电，同样会产生热量使温度上升。

红外热成像仪通过探测物体发出的红外辐射，将其转换为可视化的热图像，能够清晰地呈现开关柜表面的温度分布情况。正常状态下，开关柜各部位温度分布相对均匀，而故障区域会呈现出明显的温度差异。通过对热图像的分析，可以确定温度异常的具体位置，结合设备结构和运行原理，进一步判断故障类型。例如，若某处触头位置温度明显高于其他部位，可能存在接触不良的问题；若绝缘子表面出现局部过热，则可能是绝缘性能下降。此外，定期对开关柜进行红外热成像检测，建立温度变化趋势档案，有助于提前发现潜在故障，及时采取措施进行维修或更换部件，避免故障扩大化，保障电力系统的安全稳定运行，降低因设备故障导致的停电损失和安全风险。

4. 基于多传感器融合的智能诊断

基于多传感器融合的智能诊断为高压开关柜故障研判开辟了新路径，高压开关柜故障表现复杂多样，单一传感器获取的信息往往片面，难以精准定位故障。多传感器融合技术整合了振动传感器、局部放电传感器、红外热像仪、电流电压传感器等多种设备的信息。振动传感器捕捉设备机械运动产生的振动信号，反映操作机构和传动部件的运行状态；局部放电传感器检测绝缘缺陷引发的局部放电特征，预警绝缘故障；红外热像仪呈现设备表面温度分布，揭示热故障隐患；电流电压传感器则监测电气参数变化，辅助判断电气故障。

不同传感器获取的数据在时间、空间和特征上存在差异与互补性。通过对这些多源异构数据进行融合处理，

采用数据级、特征级或决策级融合算法，能提取更全面、准确的故障特征。融合后的数据输入智能诊断模型，如深度学习神经网络、专家系统等，模型可自主学习和挖掘数据中的潜在规律，实现对高压开关柜故障的自动识别、分类和定位。智能诊断系统还能根据历史数据和实时监测信息，对故障发展趋势进行预测，提前制定维护策略。多传感器融合的智能诊断提升了故障诊断的准确性、可靠性和智能化水平，为高压开关柜的安全稳定运行提供了坚实保障，助力电力系统向更高效、智能的方向发展。

结论

高压开关柜的故障诊断对于保障电力系统的安全稳定运行至关重要。本文分析了高压开关柜常见的机械故障、电气故障、热故障以及环境因素引发的故障类型及成因，并详细介绍了基于振动信号、局部放电检测、红外热成像以及多传感器融合的智能诊断等故障诊断技术要点。这些故障诊断技术各有特点，在实际应用中可以根据具体情况选择合适的方法或综合运用多种方法，以提高故障诊断的准确性和及时性。随着科技的不断进步，高压开关柜的故障诊断技术也将不断发展，为电力系统的安全运行提供更加可靠的保障。

参考文献

- [1] 闫志轩. 高压开关柜局部放电故障的诊断技术研究[J]. 电力设备管理, 2024(19): 291-293.
- [2] 李民坤. 基于带电检测技术的高压开关柜绝缘故障自动诊断方法[J]. 自动化应用, 2024, 65(17): 149-151.
- [3] 李震. 供配电系统高压开关柜局部放电检测技术及其应用研究[J]. 通信电源技术, 2025, 42(4): 233-235.
- [4] 张校宾. 基于红外传感图像识别的高压开关柜温度故障诊断方法[J]. 电器工业, 2024(12): 72-75.
- [5] 张云鹏. 高压开关柜电压互感器故障及维修技术[J]. 家电维修, 2024(004): 000.