

# 高压开关设备常见绝缘缺陷及放电机理分析

袁琳

中国铁路北京局集团有限公司北京科学技术研究所 北京 100000

**摘要:** 高压开关柜是高速铁路牵引供电系统最常见的设备之一, 想要保障系统运行的安全、可靠, 就要保障高压开关柜的正常工作运行。本文总结了开关柜实际运行中常见的绝缘缺陷种类, 并按其特征归纳为五种不同的放电类型, 同时总结了针对局部放电的多种检测方法, 为有针对性的设计绝缘缺陷检测手段提供了理论依据。

**关键词:** 高压开关柜; 绝缘缺陷; 放电机理; 检测方法

## 引言:

在铁路供电系统中, 高压开关柜应用的十分广泛, 发挥着重要的作用, 对整个系统的电能质量有着决定性的影响。目前电气设备的使用环境状况参差不齐, 受到各种因素的制约, 可能对整个系统的运行稳定性产生影响, 引发局部放电, 因此有必要对高压开关柜的绝缘缺陷进行详细的分类与放电机理的讨论, 为有效预防预防绝缘事故的发生提供理论基础。

## 1 开关设备常见的绝缘缺陷

对于运行中的开关设备, 常见的绝缘缺陷有异物和颗粒、接触不良、金属凸起物、绝缘子缺陷和其它缺陷等。

### 1.1 异物和颗粒

据统计资料显示, 外来异物和颗粒引起的故障占比达20%<sup>[1]</sup>, 设备内部存在的一些异物及微粒受到现场安装环境的影响, 清除不够彻底, 同时一些比较微小的异物也会影响开关设备内部零部件的功能, 造成其发生故障。

### 1.2 接触不良

在开关设备中, 我们想要有效地控制各个区域内产生的电场强度, 就要采取静电屏蔽的方式, 这些起到静电屏蔽作用的金属部件在设备的使用中, 并没有通过负载电流, 实际运行过程中可能出现接触不良、零部件老化等现象, 形成浮动电极<sup>[2]</sup>。

### 1.3 金属凸起

金属凸起缺陷主要指的是高压导体上存在的尖刺和设备内表面留有的凸起, 这种缺陷引发的故障占比有5%左右, 一般在设备的加工和组装过程中产生, 或者由机械破坏等因素引起, 金属凸起会在绝缘气体中形成高场强区域。

## 1.4 绝缘子缺陷

绝缘子缺陷引发的故障占故障总体的10%, 主要分为两种类型, 一种为绝缘子表面缺陷, 一种为绝缘子内部缺陷, 绝缘子空穴是造成绝缘子内部缺陷的主要原因, 与早期制造工艺有关; 其他缺陷的二次效应是造成表面缺陷的主要原因, 例如局部放电产生的金属微粒、异物在绝缘子表面造成的进一步破坏。

## 1.5 其他缺陷

由其它缺陷引发的故障占故障总体的11%, 比如在开关设备的某些固件与器件在运输过程中受到外力碰撞及振动的影响, 会产生松动及变形, 同时开关设备的装配流程十分繁琐, 需要由专业人员进行操作, 尤其是柜体内部及每个零部件之间的密封性能, 要求比较高, 操作不当就会产生严重的后果, 给设备的后期运行埋下隐患。

## 2 典型缺陷的放电机理

经过长期的分析研究发现, 开关设备中常见的绝缘缺陷可归纳总结为五种类型<sup>[3]</sup>, 下面对其发生、发展及击穿机理进行分析。

### 2.1 自由金属微粒

在外加电场的影响下, 开关设备内部的金属微粒会释放出电子, 金属粒子便带有正电荷, 正电荷的产生会对开关内部的电场分布产生一定的影响, 发生电场畸变。长时间的电场畸变电子就会逐渐的从金属电极表面逸出, 内部气体发生一系列的反应, 主要有光致电离、热电离、碰撞电离等, 形成放电通道及间歇。正电荷的粒子在强电场的环境中受到洛伦兹力和库仑力等影响, 使其朝着负电极方向运动。当电场强度足够强时, 自由粒子获得的能量变得越来越大, 从设备外壳及高压导体之间的缝隙穿过, 同时还可能移动到绝缘比较弱的位置。局部放电在高压导体与微粒距离比较接近的时候发生的几率就会增加, 同时在绝缘子的表面一旦自由金属微粒移动, 绝缘子沿面闪络的现象更加容易出现, 甚至发生击穿。

**课题项目:** 基于非接入分布式测量的所内高压设备故障预测及实时监测技术研究与应用 (2021BGD03)

值得一提的是,在多次自由金属微粒局部放电检测试验中发现,在电压升高到起始电压以后,自由金属微粒便会发生比较密集的局部放电,但在这个电压等级上持续一段时间以后,局部放电会变得越来越少,直至某一较为稳定的状态。根据这一现象可以发现,自由金属微粒在电场力的作用下会从高场强区向低场强区移动,即从电场畸变状态向电场均匀状态过渡。当进入低场强区以后,电场强度不足以使自由金属微粒继续移动,但此时它导致的电场畸变程度仍然可能产生局部放电,便会稳定在某一相对平衡的状态。此类局部放电通常在电压峰值来临前的电压上升期发生<sup>[4]</sup>。

## 2.2 金属突出物

金属突出物主要在设备的制造、装配过程中产生。稳态交流电压条件下,随着金属突出物附近高场强区域的产生,对内部气体的击穿场强有着一定的影响,则会发生类似尖板电极的电晕放电。电场的不均匀现象在电晕放电的影响下有所控制,有效的优化了电场在间隙中的分布,因此极间贯通性击穿现象在电晕放电状态比较稳定的情况下是很难发生的。如果遇到操作过电压、快速暂态过电压等情况,电压变化情况随着电场强度的增加而增加,这时候贯穿性击穿现象更容易发生,引发事故。金属突出物比较容易存在的位置主要有开关设备的内导体上及外壳内壁上,金属突出物在内导体上有着曲率半径小的特点,造成局部放电更加容易。此外,设备外壳内壁上存在金属突出物,在电压正半周峰值前后局部放电现象更加明显,设备内导体上存在金属突出物,在电压负半周峰值前后局部放电现象更加明显。

## 2.3 绝缘子气隙

绝缘子气隙缺陷主要指绝缘子内部气隙缺陷,其通常在生产过程中产生但又不容易被检测出,例如环氧树脂材料在固化成形过程中因为体积变化而产生的内部空隙。对于这类缺陷造成的局部放电原理有多种解释,分别为沿面放电、流注放电。绝缘子内部气隙出现的几率在我国生产工艺不断优化、出厂试验水平不断提升的情况下,变得越来越小。

## 2.4 绝缘子表面污染物

绝缘子表面的污染物种类比较多,主要为不同类型的金属微粒、气体中的水汽、放电产生的分解物等。如果在现场进行耐压试验时,发生闪络在绝缘子表面留下树状放电痕迹,也可称为绝缘子表面污染物。在诸多污染物中危害最大的当属金属微粒,其在强电场作用下发生位移并积累在绝缘子表面,对表面电场分布有着一定的影响,长时间形成大量的表面电荷,在绝缘子表面形

成堆积。绝缘子表面上一旦外加电压极性与聚集电荷极性相反,电场变化比较明显,导致沿面闪络电压发生骤降。此外,绝缘子表面电荷的存在也大幅度降低了暂态过电压条件下沿面闪络的电压,增大了发生绝缘击穿事故的概率。在过电压条件下,绝缘子表面击穿现象可能不会出现预兆而直接发生。

## 2.5 悬浮电极

在开关设备内部往往会设置一些屏蔽电极,其目的是改善内部危险位置的电场分布,与空气绝缘中的均压设备作用相似。开关设备正常工作时,屏蔽电极与其他部位的接触良好,但是由于开关设备长期反复的操作过程中会产生机械振动,以及岁月累计带来的热应力和材料老化,使得在投入使用初期接触良好的屏蔽电极接触不良,进而成为悬浮电极。此外,机械设备在静电力影响下会发生一定程度的振动,长时间的振动也是造成接触不良的原因之一,在外加电场的影响下,悬浮电极释放出电子,表面形成正电荷,悬浮电极在接触电阻比较小的情况下从高压导体上获取电子;在接触电阻比较大的情况下电场强度在电极附近变得越来越强,局部放电发生的可能性增加,如果接触电阻特别大,则有发生直接击穿的可能,使得开关设备必须直接退出运行<sup>[5]</sup>。

## 3 开关设备局部放电的检测方法

当开关设备存在以上绝缘缺陷时,极易引发局部放电现象,在整个运行的过程中,以上情况如果长时间的持续,绝缘性能就会受到损坏。如果能在初始阶段发现局部放电并加以诊断,对于提高开关设备的运行质量,预防事故的发生将有很大帮助。通常情况下,在出现局部放电的同时,可能发生一些电气现象,主要表现为电磁波辐射增加、电流脉冲增加、介质损耗增加等;同时还可能发生一些非电气现象,如声、光、热的变化等,想要对局部放电现象进行有效的检测,可以充分地利用以上现象。

### 3.1 局部放电的非电气检测法

#### 3.1.1 声检测法

如果绝缘内部发生局部放电,在放电处会产生超声波,并向四周不断传播。若要捕捉超声波信号,可将超声波传感器安装在电器设备外壳上,在经过更进一步的处理分析后,就可以起到检测局部放电的作用。

声测法的特点是抗干扰能力较强、使用方便,通过逐点测量和比较,还可对缺陷进行定位,既可应用于运行设备,也可在耐压试验时检测局部放电。

#### 3.1.2 光检测法

随着光子在绝缘内部局部放电时被释放,同时产生

的还有光辐射, 想要检测到局部放电产生的光量, 只能在透明的介质环境中, 否则很难实现对光量的检测。

近些年来, 由于光纤技术的迅猛发展, 可利用光纤技术与声测法相结合成为声-光检测法。其基本原理是: 设置专门的光纤传感器, 局部放电产生的声波信号压迫会改变光纤性质, 从而导致光纤传感器输出信号的变化, 间接反映了局部放电的发生。

### 3.1.3 化学检测法

想要对绝缘油中溶解的气相色谱进行分析, 气相色谱仪是必不可少的设备之一, 也是近年发展起来的新试验方法。想要了解设备内部存在的绝缘缺陷, 分析和研究溶解气体成分和含量的方式是关键。例如绝缘部分如果分解出二氧化碳、一氧化碳、烃类物质等, 就说明设备内部存在放电缺陷, 它们溶解于绝缘油即改变了原始气体含量。局部放电所造成的气相色谱变化是 $C_2H_2$ 和 $H_2$ 的含量增大。

此种方法灵敏度相当高, 而且设备不需停电, 操作简单, 适合应用于在线绝缘诊断。

## 3.2 局部放电的电气检测法

### 3.2.1 脉冲电流法

想要检测设备的放电量, 脉冲电流检测法是十分普遍的一种手段, 设备出现局部放电的情况下, 两端电压在短时间内会出现一定的改变, 能够在回路中检测出高频脉冲电流, 想要对电流进行准确的测量, 需设法将高频脉冲电流转变为电压脉冲。

此方法灵敏度高, 应用较为广泛。

### 3.2.2 暂态地电波法

若开关设备的绝缘介质中出现局部放电, 放电发生处会向四周发射高频电磁波, 由电磁兼容原理可知, 连续的金属可以阻止电磁波的传播, 但是实际上设备屏蔽层不可能做到绝对连续, 局部放电产生的电磁波仍有途径可以传播到设备金属壳以外。此时加装电容性传感器, 感应到这些电磁波后, 会对地产生一定的暂态电压脉冲信号, 可反映放电脉冲的幅值、频率等多种信息, 对开关柜内可能出现的局部放电现象有效的进行检测。

此方法应用广泛, 市场上较成熟的局部放电检测仪器大部分均采用暂态地电波法。

### 3.2.3 介质损耗法

绝缘介质在局部放电的情况下, 能量消耗加剧, 其也会导致介质的损坏, 增大 $\tan \delta$ 。局部放电是否发生可以通过 $\tan \delta$ 来判断, 实时了解绝缘介质的性能。

该方法只能做定性判断, 不能做定量检测, 因此在现场应用层面非常受限。

## 3.3 声电联合定位法

### 3.3.1 定位原理

对开关柜局部放电及放电量大小的监测, 只能了解到开关柜确实存在故障, 但是不能了解到具体情况, 不能找到局部放电的位置, 对其进行维修和养护的难度仍然比较大, 消耗大量的维修时间和维修成本。

能够准确实现定位的主要方式为声电联合法。局部放电可以通过超声波信号进行定位, 但是在开关柜内部, 信号会出现衰减及折射现象, 信号的同时性较差。而在空气中电信号与光传播的速度基本相同, 因此开关柜内衰减及延时的现象可以忽略不计, 所以我们使用的触发信号一般都为电信号, 局部放电与超声波传感器之间的传播时间就是电信号与声信号之间的时间差。

### 3.3.2 算法实现

以TEV(暂态地电波)信号为时间基准, 我们根据实际情况将四个超声波传感器安装在开关柜相应位置,  $T_i$ 为TEV信号与超声波信号的时间差, 当作局放源 $P(x, y, z)$ 到各超声波传感器 $S_i(x_i, y_i, z_i)$ 的传播时间, 用声速 $v$ 乘以时间差 $T_i$ 得到局放源到各超声波传感器的空间距离 $vT_i$ , 即可列出球面坐标方程<sup>[6]</sup>:

$$(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 = (vT_i)^2$$

以上为我们计算得出的超定方程组, 想要进一步的优解, 可以采用牛顿迭代法和最小二乘法, 获得局放源 $P(x, y, z)$ 的坐标, 在确定时间差 $T_i$ 时, 以出现超声波局部放电信号的最大幅值点作为参考时间进行计算。

## 4 结语

近年来, 高压开关柜事故有很大一部分是由于绝缘劣化等原因引起的, 因此, 深入了解绝缘缺陷的产生和放电机理, 研究检测局部放电的各类方法, 为现场检测装置的设计及检修方案的选定提供了理论基础。

### 参考文献:

- [1] 李大江. 10kV 开关柜电气故障分析与处理[J]. 工程论坛, 2005, (19): 114.
- [2] 赵智大. 高电压技术(第三版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [3] 周倩. 组合电器局部放电超高频信号教学模式构建和模式识别研究[D]. 重庆大学. 2007.
- [4] 覃宇. 高压开关柜局放特性的研究[D]. 华南理工大学, 2015.
- [5] 宋蓓华. 基于声电联合的GIS局部放电带电检测技术研究[D]. 上海交通大学. 2012.
- [6] 李海德. 基于TEV与超声波的高压开关柜局部放电检测方法研究[D]. 华北电力大学. 2013.