

# 电力电缆局部放电特征分析及运维检修策略研究

刘 阳 郭崇喜

(宿迁三新供电服务有限公司泗洪分公司, 江苏 宿迁 223900)

**摘要** 电力电缆作为一种重要的输电设备, 被广泛使用在电网装配建设中。由于敷设在地下, 长期与湿润的土壤接触, 绝缘性能会慢慢下降, 加上制作工艺和材料的缺陷, 也会使绝缘的性能下降, 从而发生停电事故。随着地下电缆的大量敷设和长时间使用, 越来越多的电缆开始出现或大或小的绝缘缺陷, 发生电力事故。电力电缆局部放电检测是检测电缆绝缘状态的重要故障检测方法, 基于此, 本文主要对电力电缆局部放电特征分析及运维检修策略相关方面进行分析和探究。

**关键词** 电力电缆 局部放电特征 运维检修

中图分类号: TM75

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)12-0124-03

## 1 局部放电原理

局部放电在我国的放电测量标准定义为: “导体间绝缘仅被部分桥接的电气放电”, 同时对局部放电出现的区域进行了描述“可以发生在导体附近, 也可以不发生在导体附近”。

电缆绝缘中产生的局部放电原理可以用三个电容的串并连模型来解释, 以绝缘内部气隙放电等效电路为例。

其中  $C_g$  是气隙放电等值电容,  $C_a$  是与气隙放电串联的正常绝缘等值电容,  $C$  是正常绝缘等值电容, 总体等值电容的公式为:

$$C_1 = C + \frac{C_a C_g}{C_a + C_g}$$

当在电极两端施加电压  $U_m$  时, 气隙所承受的电压为:

$$U_g = U_m \frac{C_a}{C_a + C_g}$$

由于电缆绝缘层气隙都比较小, 其等值电容  $C_g$  比  $C_a$  大得多, 可知,  $U_g$  比  $U_m$  小得多。电缆在出厂使用后, 各部分的等值电容数值变化不会发生改变, 根据  $U_g$  的公式可知, 气隙所承受的电压值正比于外加极间电压值, 当外施电压很小时, 气隙承受电压非常小, 导致局部放电熄灭, 外施电压不断升高到所承受的最大电压值后, 局部放电开始发生。在电缆正常工作时所加的电压都为工频交流电压, 随着所加电压的慢慢升高, 气隙所承受电压也在加大, 局部放电开始发生, 由于施加的是交流电, 在电压最大后, 电压又开始下降, 局部放电再次熄灭, 放电具有一定的周期性。这种周

期性的局部放电脉冲可以用来判断局部放电是否产生及放电的多少<sup>[1]</sup>。

## 2 局部放电类型

引起局部放电现象的产生有很多因素, 电力电缆缺陷的部位和其作用机理不同, 可以将局部放电分为不同的类型。根据相关人员的大量研究分析, 将局部放电分为 4 种常见类型, 为分别是内部气隙局部放电、尖刺局部放电、沿面局部放电和悬浮局部放电。明晰每种放电类型产生的原因和作用机理对于电力电缆的日常维护和提前事故预警有重大意义, 下面对这几种放电类型进行介绍。

### 2.1 内部气隙局部放电

内部气隙局部放电也可以叫做气泡放电或者气隙放电, 经常出现在电力电缆绝缘层介质里面或者介质层与缆芯交界面的气泡之中, 这些微小气泡所承受的电场强度高于电缆绝缘层介质的电场强度, 并且微小气泡外加的电场强度比最小击穿场强高的时候, 就会出现局部放电, 这种放电被叫做内部气隙局部放电。该局部放电与所承受的外加电场强度息息相关, 绝大多数出现在绝缘层内部电场强度低的部位, 同时也受绝缘材料耐压性能以及场强分布的影响<sup>[2]</sup>。

### 2.2 尖刺局部放电

尖刺局部放电是由于电力电缆内部出现细小毛刺或者尖端突出等因素引起的, 随着外部场强的增加, 尖端附近的电场积聚在一起, 这种极不均匀电场导致尖刺局部放电的发生, 随着时间的增加, 电力电缆的

绝缘会被击穿。在开始阶段，尖刺局部放电在尖刺的尖端部位发生，绝缘层以及导体交界面之间的缝隙没有被击穿，所以这类局部放电易于在这种曲率半径小的尖刺或者曲率大的尖刺顶部积聚电荷。在电力电缆长时间运行时，电荷积聚增多，场强变强，因此在这些尖刺部位更加容易出现尖刺局部放电，一般在负半周期，然而在电场强度足够大的情况下，才会在正半周期产生放电信号，并且这种放电不止产生电信号，还会伴有声、光、热等物理现象或者化学现象一同发生<sup>[3]</sup>。

### 2.3 沿面局部放电

沿面局部放电经常发生在橡胶和环氧树脂分界面之间，当二者之间接触有缝隙的时候，该分界面承受的电场强度高于其最小击穿电场时，沿着绝缘介质表面发生局部放电，这种放电常常发生在隔离开关、套管、电缆等电气设备的外表面。正常情况下，沿面放电的起始放电电压比内部气隙放电电压低很多，并且绝缘体表层的光滑程度、周围环境的污秽多少和气候条件对其起始放电电压有重要影响。

### 2.4 悬浮局部放电

悬浮局部放电是因为电力电缆导体或者附件内部存在自由悬浮金属颗粒，由于结构上的原因，随着外界电场的增强导致悬浮金属颗粒失去接地，对地产生高电位，从而引起局部放电现象。这种放电一般出现在调压绕组、起固定作用的金属螺栓以及高压套管接触不紧密之中<sup>[4]</sup>。

## 3 局部放电在线检测方法分类

局部放电在线检测方法根据其检测原理可以分为差分法、电容耦合法、方向耦合法、超声波法、超高频法与电磁耦合法等检测方法。

### 3.1 差分法

差分法最早是由日本东京电力公司和日立电缆公司共同研究提出的，这种方法适用于110kV及以上的电缆中。差分法需要将两个金属箔片分别安装在电缆两侧的金属屏蔽层上，在两个金属箔片中间串联一个合适阻值的检测阻抗，该阻抗与绝缘层的等效电容、金属箔与绝缘金属屏蔽层的等效电容构成了一个完整的回路，如果电缆内部出现局部放电脉冲信号，就会被耦合到。但是该方法两侧的等效电容很难相等，受干扰容易误判，检测频带窄，使用的局限性较大。

### 3.2 电容耦合法

电容偶合法是由英国南安普敦大学与西安交通大学共同研究出的一种在线检测方法。该方法需要将电缆上部分的外护套去掉，漏出外半导电层，将金属箔片贴在该外半导电层上，金属箔片就相当于检测电极。

在工频运行下，外半导电层的阻抗非常小；在高频运行下，外半导电层阻抗可与绝缘处阻抗相比，所以可以认为外半导电层在工频运行时等于地电位，在高频运行时金属屏蔽层为地电位。这种方法接入电容传感器不会对电缆绝缘有影响，也有利于获取高频放电脉冲信号，灵敏度高，但容易受到周围环境电磁干扰的影响，不能准确地将局部放电信号提取出来。同时这种方法需要将电缆绝缘破坏，对工作人员的技术要求严格，之后还需要将电缆恢复原样，保证绝缘、防水等性能不发生改变。这套检测系统应用比其他几种检测方法更加困难、代价较大，还需要剥去电力电缆的部分金属护套，限制了超高频电容耦合法的广泛使用。

### 3.3 超高频检测法

超高频检测方法起源于20世纪80年代，是检测电气设备局部放电时产生电磁波的一种新兴的在线检测技术。由于使用的传感器频带非常宽，从几百MHz到几十GHz，该频带范围属于超高频范围，所以被命名为超高频检测方法。该方法起初用于GIS设备局部放电的检测，灵敏度高。在检测局部放电的同时，可以结合不同的算法实现故障定位、放电缺陷类型识别等，因此超高频也被应用在发电机与变压器的局部放电检测中，取得了良好的效果。超高频检测方法可以分为超高频窄带在线检测及超高频超宽带在线检测，后一种检测方法的带宽最大可到数GHz以上。在电力系统正常运行时，周围环境产生的噪声一般都在低频段内，超高频超宽带检测噪声抑制比高、含多种信息、可以避开常规试验时难以剔除的电气干扰等优点，越来越受到人们的青睐。超高频超宽带检测就是我们使用较多的超高频检测，其中常用的是阿基米德螺旋天线进行局部放电测量。

### 3.4 超声波检测方法

超声波检测局部放电的方法出现很早，在很多领域都被广泛地使用。在电力电缆产生局部放电脉冲信号时，不只是产生电信号，同时也产生光信号及声音信号等。接收到声信号的超声波传感器，将其转化成电信号，因为电信号更容易被解析，其本质是把声音的能量转化成为电能量。因此超声波检测方法可以检测电力电缆是否有局部放电的现象产生，超声波传感器价格较其他传感器便宜，使用技术相对成熟。

超声波传感器检测局部放电可以提高效率，还能在一定程度上节省人力物力。该方法最开始用在GIS、电机及变压器中检测局部放电，取得了不错的成果，因此可以用在电缆的局部放电在线检测中。在电缆产生局部放电时，会伴随声、光、热、电等物理现象的产生，也会有化学变化的产生，其中的超声波信号将会从电

缆内部逐渐向外释放，最终使用超声波传感器接收。通过分析采集的超声信号，可以推测出电缆内部绝缘放电的状况，预防电力系统事故的发生。超声信号的频率分布广泛，但是在实际环境中超声波信号的传播会逐渐衰弱，超声波传感器接收到的信号会比较微弱。这种方法容易受到周围环境的电磁干扰影响，局部放电脉冲信号无法被精准地提取，因此需要高灵敏度的超声波传感器。

### 3.5 方向耦合方法

方向耦合方法在线检测技术是基于方向耦合器的一种检测方法，由德国柏林大学、德国西门子公司以及美国惠普公司在1999年联合提出的。该方法将金属的方向传感器装配在电缆的外半导体层与金属屏蔽层之间，在两个端口接引出线。方向耦合的检测原理是：当局部放电脉冲经过方向传感器时，传感器两端的电容耦合极性一致，电感耦合方向极性不一致。当两端的耦合信号叠加在一块时，一端信号强而另一端信号较弱，通过比较两端信号的大小就可以判断出电缆绝缘层中是否产生局部放电。

### 3.6 电磁耦合法

电磁耦合法最初使用在电机与变压器局部放电在线检测中，之后开始逐步被应用在不同电气设备局部放电脉冲信号的检测。近些年来，国内外的电缆投入量越来越多，电缆绝缘受到破坏的情况也随之增多，引起很多的电力事故，因此该方法开始引入电缆绝缘局部放电的检测中。基于电磁耦合原理传感器样式多种多样，尤以罗格夫斯基(Rogowski)线圈制作的高频宽带传感器使用最为广泛。

基于罗格夫斯基线圈的传感器，使用不同的磁芯，其频带范围一般也不同，性能上也会有所差异。高频电流传感器被应用在电力电缆局部放电检测中，频带范围一般从300KHz到30MHz。高频电流传感器一般安装在电力电缆接地电缆处、电缆本体以及电缆金属屏蔽层处，该方法操作简单，不需要直接接触电缆内部，也不需要对电缆做相应的处理，对工作人员技术要求不高，所以可以直接用在电缆运行时绝缘的局部放电在线检测中，起到预防性，防止电力系统发生事故。除此之外，由于测量部分和电缆没有直接电气联系，并且测量范围较宽，能够较好地抑制周围电气信号以及噪声信号等低频信号的干扰，可以精确地耦合到局部放电脉冲信号，灵敏度好。综上所述，使用电磁耦合法测量局部放电信号具备操作方便、保护人身安全、灵敏度高和抗干扰能力优异的特点，是应用范围相对广泛的一种电力电缆局部放电在线检测方法。

由于电磁耦合法满足在线检测的要求，不会对电缆结构造成损坏，工程中易于实施，高频电流传感器套在接地电缆上，在检测过程过人员与运行中的电缆无实际接触，可以保证工作人员的人身安全，所以选用该方法进行电力电缆局部放电在线检测。

## 4 电力电缆运维与检修策略

1. 定期对直流电缆的中间接头进行局部放电检测，通过对电缆接头进行连续、实时的检测，根据局部放电的连续变化趋势，以设备当前的实际工作状况为依据，对设备进行纵向(历史和现状)、横向(同类设备的运行状况)的比较分析，以识别故障的早期征兆，对故障部位严重程度及发展趋势做出判断，进行电缆运行状态评估和预测。

2. 有缺陷的电缆线路在升压过程中易诱发局部放电信号，待电压平稳后，局部放电信号趋少，但在临近击穿时局部放电频次增多。为此，建议在交接试验升压过程中进行局部放电检测，一旦在升压过程中发现局部放电信号就将此电缆列为重点监测对象，实行进一步的重点监测，或直接更换<sup>[5]</sup>。

3. 直流电缆发生局部放电的过程存在放电起始期、空隙期、发展期，因此在高压电缆运行时对电缆接头进行局部放电检测，一旦捕捉到该高压电缆存在零星局部放电信号，就应将该电缆列为重点监测对象，进行进一步的检测与确认。

## 5 结语

电缆绝缘局部放电是十分漫长的过程，不同阶段的放电特点也可能不同，并且同一缺陷在电缆的不同位置放电特点也可能稍有不同。针对放电特性对绝缘老化进行维护检修，可提升电缆使用寿命。

## 参考文献：

- [1] 高二超, 汪森. 电力电缆局部放电机理及检测方法探究 [J]. 农村电气化, 2022(02):85-87.
- [2] 何丽娟, 孙涛. 电力电缆局部放电检测技术研究 [J]. 九江职业技术学院学报, 2021(03):20-21.
- [3] 顾哲屹, 刘亨洋. 用于电力电缆局部放电检测的频率可调振荡波电路研究 [J]. 电工技术, 2021(05):24-25, 28.
- [4] 胡悦群. 电力电缆局部放电定位研究综述 [J]. 电气开关, 2020, 58(04):1-4, 8.
- [5] 陈庆国, 蒲金雨, 丁继媛, 等. 电力电缆局部放电的高频与特高频联合检测 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(04):39-44.