基于空间电磁波检测的车载式变电站电气设备局部放电定位系统

变电站内的电气设备发生局部放电时会辐射出电磁波信号，针对敞开式变电站全站电气设备局部放电的检测和定位，研究了基于空间电磁波信号的车载式变电站电气设备局部放电定位系统，对系统的组成及定位原理进行了阐述，对时延信号的求取方法进行了研究，通过实验室试验对该系统的定位效果进行了验证，结果表明，该系统能够准确地对变电站设备发生的局部放电进行检测和定位。

林　敏[1]　杨景刚[2]　贾勇勇[2]　赵　科[2]　张子阳[1]/1. 国网江苏省电力公司
2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院

林　敏/高级工程师

关键词/Keywords
电磁波·
局部放电·
定位·
车载·

局部放电是发生在介质中的局部击穿现象，电气设备在工作电压下的局部放电是使绝缘老化并发展到击穿的重要原因，因此局部放电检测对于及时发现设备绝缘缺陷，避免绝缘击穿具有重要意义[1,2]。局部放电源的定位可对设备缺陷进行针对性处理，减小停电时间并提高检修效率。对于敞开式变电站，站内有变压器、互感器、避雷器、导线和套管等多个一次设备，任何一个设备都有可能发生内部或外部的放电[3]。目前除了对变压器等大型贵重设备施加局部放电在线监测外，由于成本原因对其余设备基本未施加在线监测装置。而站内任何设备的绝缘击穿都可能会导致事故的发生，威胁电网的安全。因此，研究可对敞开式变电站全站设备的放电情况进行检测并进行局部放电源定位的检测装置，对于设备的安全维护具有重要意义。

局部放电的检测与定位方法目前有超声波法、特高频法等，超声波法在空间的衰减较快，目前主要用于变压器的局部放电源定位，而不适合于空间定位。特高频法自从英格兰 Strathclyde 大学提出后，在 GIS 和变压器局部放电的检测上得到了广泛应用。其基本原理为：当介质中发生局部放电时，会辐射出电磁波信号，通过对电磁波信号的检测，从而进行局部放电的检测。为了对敞开式变电站的全站设备进行局部放电的检测和定位，Strathclyde 大学研究了基于空间电磁波信号的局部放电定位系统，该系统需要人工在变电站现场布置传感器，现场操作较为麻烦。

为了解决变电站现场实时进行设备局部放电定位的问题，本文研制了基于空间电磁波信号检测的车载式变电站电气设备局部放电定位系统，其基本思路为：通过在检测车的顶部安装四个天线，进行设备产生局部放电时空间电磁波信号的耦合，并计算出放电源的位置。采用车载式方式可实时进行局部放电定位，适合于对不同变电站的巡检，工作效率比人工布置传感器要高很多。本文对该系统的组成及实现方案进行了阐述，并通过实验室试验证明了该方法的有效性。

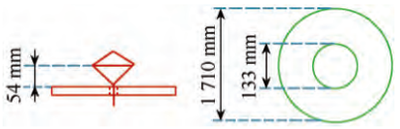
系统组成

当局部放电发生在设备内部时，如变压器内部的油纸绝缘，一方面放电所产生的电磁波信号可以通过套管向外传播，另一方面电磁波在传播的过程中遇到障碍物或者孔的尺寸与电磁波波长 λ 相近或小于 λ 时，会发生明显的衍射现象，此时电磁波会离开直线传播的路径而绕到障碍物背后传播[4]。而局部放电所激发的电磁波具有频率范围广的特点，因此即使是发生在设备内部的放电，也会通过箱体夹缝或者

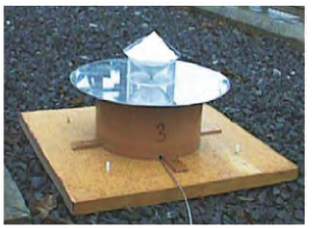
中国知网　https://www.cnki.net

GIS 盆式绝缘子等传播出来。

当设备外部发生放电时，如常见的金属尖端、接触不良导致的悬浮电位等，也会产生电磁波信号，与在变压器等设备内部产生的放电不同，此时的放电脉冲前沿要缓，其所激发的电磁波信号频率范围会集中在低频段，这主要是与发生放电所在的介质不同有关。研究表明，当介质绝缘强度高时，其所产生的放电脉冲上升沿陡，激发的电磁波信号频率高；而当介质绝缘强度低时，其所产生的放电脉冲上升沿缓，激发的电磁波信号频率低。由此可见，在对整个变电站设备进行监测时，由于放电可能发生在设备内部，也可能发生在设备外部的金属部件中，因此监测频带要求覆盖到整个可检测范围，根据以上分析，传感器采用宽带传感器，其频带范围为 10 MHz ~ 1 GHz。传感器采用圆盘传感器，其结构如图 1 所示。



(a) 传感器结构图



(b) 传感器实物图

图 1　圆盘式传感器结构

系统组成如图 2 所示，其中采集装置采用高速示波器 TEK7104，其具有 1 GHz 的带宽，2.5 GHz的采样率。上位机控制示波器进行采集，并将数据实时传输到上位机进行分析处理，系统原理如图 2 所示。

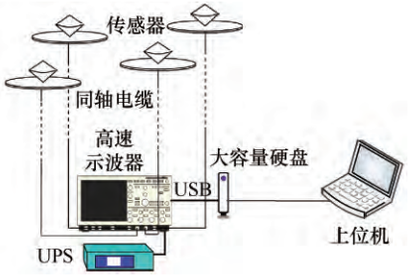


图 2　监测系统组成

四路传感器可安装在车顶，通过电缆将四路信号引入到检测车内，示波器、存储硬盘、UPS 及上位机位于车内，组成车载式定位系统，如图 3 所示。

图 3　车载式检测系统

整个系统采用车载方式，具有使用灵活、检测方便的优点，可沿敞开式变电站的巡检路线行驶进行移动式检测，从而达到多个位置检测和定位的目的，大大提高了定位的准确程度。

定位原理

对于本系统，四个传感器架设在一个水平面上，传感器中心形成的矩形尺寸为 1.2 m × 1.5 m。对于敞开式变电站，设备距离检测车的距离相对较远，因此设备如果存在局部放电，放电产生的电磁波信号到达传感器的角度区域往往不超过 ±5°，因此可忽略设备的高度，将设备当作是平面上的一个点进行 2 - D 定位。

由于本系统是车载式系统，可在移动过程中不断调整测试位置进行实时测量，因此采用 2 - D 定位在现场最具有实用性。

2 - D 平面中传感器采用阈值触发，即四个传感器中某一个接收到有效信号后同时触发四路传感器进行采集。传感器的布置和局部放电源到达传感器的关系如图 4 所示。

图 4 中，①、②、③、④为四个布置在一个平面上呈现矩形的传感器组，四个天线的中心定义为 O 点，以此建立笛卡尔坐标系，局部放电源坐标为 (x, y)，则有如下方程

$$c^2(t_k - \tau)^2 = (x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 \quad (k = 1,2,3,4) \tag{1}$$

式中，c 为光速；(x_k, y_k) 为第 k 个传感器的坐标；t_k 为放电信号到达第 k 个传感器的时间；τ 为

中国知网　https://www.cnki.net

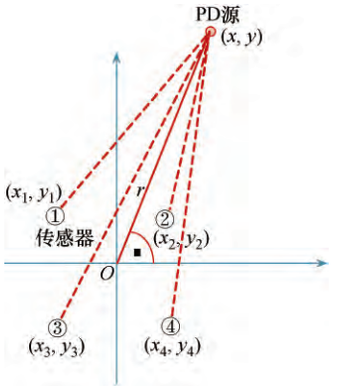


图 4　传感器布置示意图

信号发出时刻的时间；$t_k-\tau$ 为信号经过放电源与第 k 个传感器之间所用的时间。

可将笛卡尔坐标系转换成极坐标系，采用距离 r 和方位角 θ 进行放电源位置的表征，可得

$$c^2(t_k-\tau)^2=(r\cos\theta-x_k)^2+(r\sin\theta-y_k)^2 \quad (k=1,2,3,4) \tag{2}$$

根据式（2）进行方位角 θ 和距离 r 的求取。

在实际的检测过程中，通常得不到放电脉冲发出时刻的时间，只能得到两个传感器之间的时间差，即信号到达时延，因此，针对式（2），可以改写成基于时延的公式，以传感器一和传感器二为例，可得

$$\Delta_{1,2}=\frac{1}{c^2}\sqrt{(r\cos\theta-x_1)^2+(r\sin\theta-y_1)^2}-\frac{1}{c^2}\sqrt{(r\cos\theta-x_2)^2+(r\sin\theta-y_2)^2} \tag{3}$$

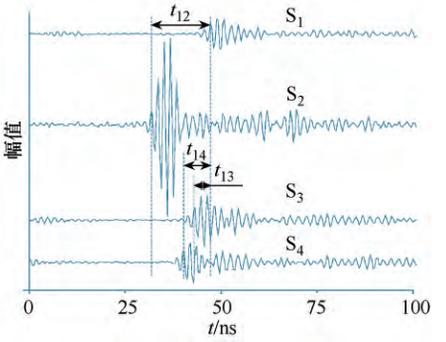
式中，$\Delta_{1,2}=t_1-t_2$，为传感器一接收到的信号和传感器二接收到的信号之间的时间差。可以看出，两路传感器之间的时延（时间差）估计是保证定位计算准确的关键因素。系统采用信号的累积能量法进行时延的计算。

放电产生的电磁波信号可以转化为累积能量曲线来确定信号之间的时间差。累积能量 X 可以按照如下公式进行计算

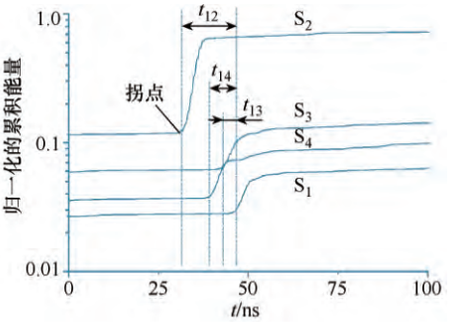
$$X_j=\sum_{k=0}^{j}V_k^2 \tag{4}$$

式中，V_k 为信号波形上的第 k 个点的电压值。

计算出累积能量 X 之后，以时间为横坐标，累积能量为纵坐标，作出信号的累积能量曲线，信号时域波形和累积能量如图 5 所示。信号的能量总是稳定地衰减，所以累积能量曲线最终趋向于水平，其最终的纵坐标值代表了接收天线全部接收的能量。曲线的趋势是先缓慢上升，然后在一点处开始急剧上升，到最终趋于水平，曲线上出现急剧上升的点称为拐点，此时放电信号开始超过背景噪声。信号时延可以通过比较每条曲线的拐点处的时间得到。



（a）电磁波检测时域信号



（b）累积能量曲线

图 5　累积能量曲线拐点法估计时延

通过以上方法即可求出时延，并代入式（3）所示方程组，即可求出方位角和距离。

实验室及现场应用结果表明，该检测系统的定位准确度为：当局部放电源距离检测系统大于为 10 m 时的定位误差为 0.5 m，放电方位的定位误差为 ±8°；当局部放电源距离检测系统大于为 150 m 时的定位误差为 5 m，放电方位的定位误差为 ±10°。

实验室试验及现场应用

1. 实验室试验

实验室中采用一个 110 kV 避雷器作为放电源，将试品避雷器的多片伞裙割破，并将三个铁钉在避雷器垂直等距分布打入避雷器的环氧树脂

中国知网 https://www.cnki.net

层，再用扁铜导线将三个铁钉连接，与避雷器顶端和底端保持约 30 cm 的距离，然后在伞裙上喷水，人为制造一个避雷器外绝缘损坏的放电试品，试品如图 6 所示。

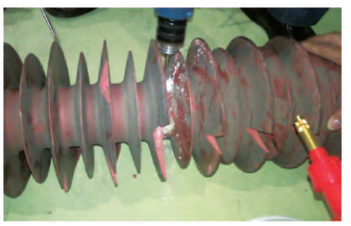


图 6　避雷器外绝缘损坏试品

实验室试验中将避雷器放置在检测系统正前方 10 m 处和正右侧 10 m 处两个方位进行定位试验，同时采用脉冲电流法进行辅助检测，如图 7 所示。

图 7　试验时试品摆放位置示意图

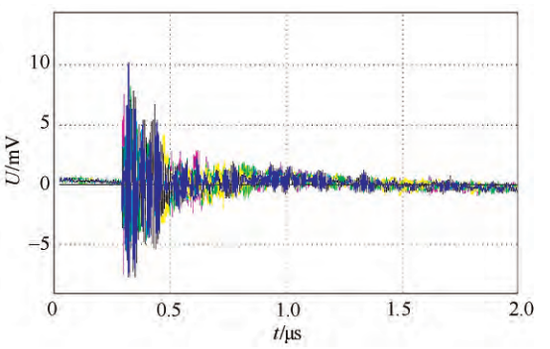
当外加电压升高到 45 kV 时，本系统和脉冲电流法均检测到明显的放电信号，当试品放置在系统正前方时，所采集到的信号如图 8 所示。

图 8a 为完整的 2 μs 内的检测信号，图 8b 为四路传感器检测得到信号的波头部分。可以看出，由于试品处于系统正前方，传感器一和传感器二的信号基本同时到达，传感器三和传感器四的信号基本同时到达。多次测量定位结果为：放电方位角在 95° ~ 101°之间，放电源距离检测系统中心的距离在 9. 8 ~ 10. 3 m 之间，定位结果与实际结果基本吻合。

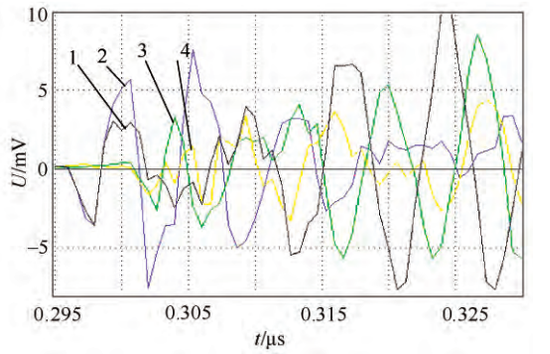
将避雷器放置在检测系统正右侧 10 m 处的试验结果与上述情况相似，本文不再赘述。

2. 现场应用

2011 年 12 月，采用本系统在某 110 kV 变电站进行了移动式检测。当检测车在巡检通道行驶时，检测到了明显的放电信号，时域波形信号如图 9 所示。

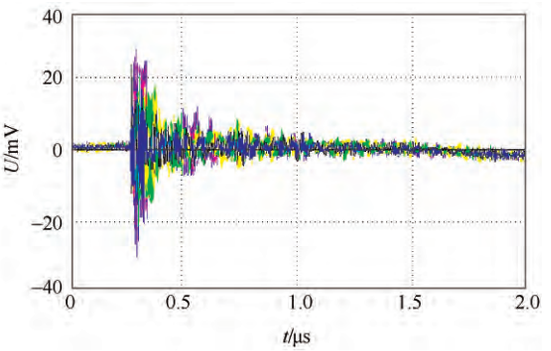


(a)　系统检测波形

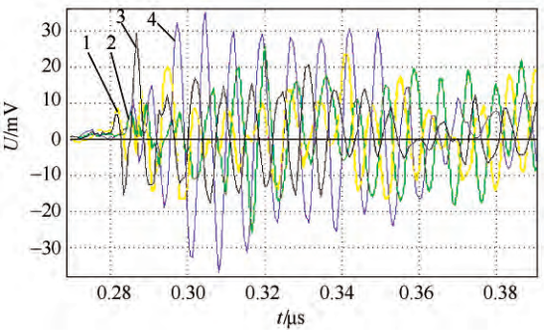


(b)　四路传感器的波头信号

图 8　试品位于正前方时的检测信号



(a)　完整时域波形



(b)　时域信号波头部分

图 9　检测到的时域波形

中国知网　https://www.cnki.net

经过系统定位，发现在该系统的 180°附近有明显的放电信号，放电点和检测系统之间的位置示意图如图 10 所示。放电点和检测系统之间的距离约为 50 m。

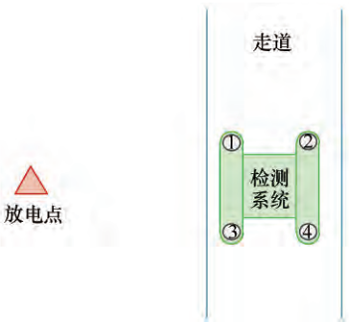
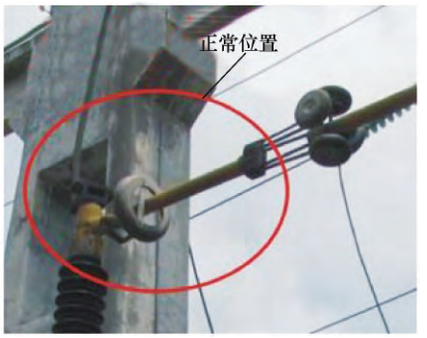


图 10　放电点与检测系统位置示意图

随即在现场对定位点附近的设备进行检查，发现该处某母联开关侧的均压环脱落，引发了悬浮放电，故障点如图 11 所示。

(a)　故障点情况



(b)　正常时情况

图 11　定位到的故障点

从图 11 中可以看出，正常情况下均压环为固定状态，而故障点处的均压环侧出线固定点脱落，导致均压环压在导线上，从而导致接触不良、屏蔽失效，引发局部放电。经过处理后该故障点消失，放电信号也随之消失。

结束语

研制了基于空间电磁波信号的车载式变电站电气设备局部放电定位系统，该系统采用固定在车顶的四组天线式传感器进行空间电磁波信号的耦合，并利用累计能量法进行时延信号的计算，进而获得放电源与传感器之间的方位角和距离。实验室检测表明，该系统可对电气设备产生的局部放电进行有效检测和故障定位，由于采用车载式系统，可利用同一套系统对不同的变电站进行移动式检测，可节约成本，具有较强的工程实用价值。

参考文献

[1]　李军浩，司文荣，李彦明，等. 油纸绝缘内部气隙缺陷电劣化过程中局部放电的测量与模拟 [J]. 中国电机工程学报. 2009，29 (31)：128-134.

[2]　李军浩，司文荣，姚秀，等. 油/纸绝缘沿面局部放电特性研究 [J]. 西安交通大学学报，2009，43 (6)：108-116.

[3]　李继胜，赵学风，杨景刚，等. GIS 典型缺陷局部放电测量与分析 [J]. 高电压技术，2009，35 (10)：2440-2445.

[4]　马西奎. 电磁场理论及应用 [M]. 西安：西安交通大学出版社，2000.

(收稿日期：2014-02-08) EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

中国知网　https://www.cnki.net