

工业声学成像技术在变电站缺陷定位的应用

张凯峰<sup>1</sup>,邱 耀<sup>2</sup>,周 强<sup>3</sup>

(1. 国网江西省电力有限公司宜春供电分公司,江西 宜春 336000;2. 国网湖南省电力有限公司湘西供电公司,湖南 吉首 416000;  
3. 深圳麦格米特电气股份有限公司,广东 深圳 518000)

**摘 要:**随着电力系统规模不断扩大,变电站数量增多,设备数量激增,传统依赖听觉、触觉的定性判断难以定位隐蔽缺陷。工业声学成像技术对高压电气设备局部放电、绝缘系统劣化等缺陷的早期迹象具有很好的预见性,可在相应电气设备开始产生热量前,实现缺陷精准定位,及时发现接触不良、材料老化、过电压冲击等原因导致的异常放电点。文中介绍了声学成像技术和声成像技术原理,通过分析多起异常放电点缺陷,详细阐述了变电站设备局部放电的具体原因和处理方法,为快速锁定变电站设备缺陷位置,消除设备缺陷和隐患提供支持,为变电站一次和二次检修工作提供依据。

**关键词:**局部放电;高压设备;缺陷定位;设备检修

**中图分类号:**TM 411 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)06-0072-03

0 引言

变电站设备人工巡视主要通过“眼观六路、耳听八方、感受温度、鼻嗅异味”的传统方法,这种方法需要通过系统化感官训练和经验积累,可发现设备较为明显的缺陷,被认为是变电站安全运行的第一道防线。随着电网规模扩张,传统巡视方法面临效率瓶颈,红外测温技术<sup>[1]</sup>通过温度可视化,将隐性缺陷转化为可量化分析的图像数据<sup>[2]</sup>,减少传统巡视工作量70%以上,实现电网规模扩张下的运维质效倍增<sup>[3]</sup>。

超声波检测技术作为目前广泛采用的带电检测手段<sup>[4]</sup>,无论是开放式电气设备还是封闭式电气设备,超声波检测技术都可以在任何电压条件下完成对局部放电的检验。在具体实践中,高压电气设备运行异常前,通过使用超声波检测技术,均可以迅速完成故障检测定位。与红外热成像检测所不同的是,超声波检测技术及其装置能够在电气设备的放电初期(最初阶段)就完成放电检测,远在相应电气设备开始产生热量前<sup>[5]</sup>。但在一二次电气设备上应用效果并不明显,主要原因是一次设备通常在大电流环境下工作,所以一次设备

发热为主且局部放电初期现象不明显;二次设备一般在智能终端柜或端子箱中,放电缺陷难以发现。

工业声学成像技术普遍利用麦克风阵列波束形成技术,定位局部放电超声波声源位置<sup>[6]</sup>,其原理是在一定空间内,检测声音传感器所接受到声波信号的相位差异,依据相控阵原理,计算出声源位置和幅值,计算的声源位置即局部放电的位置。当高压电气设备上存在局部放电点时,该放电点会如“水波”一样向四面八方发出超声波,超声波被麦克风阵列所捕捉到,便能确定高压设备上局部放电的声源位置<sup>[7]</sup>;工业声学成像仪通过一系列数学和物理变换处理,得到声像图,在相同视角下,麦克风阵列正中间的摄像头也同时拍到了可见光视频画面;通过声像图和视频画面的相结合,变电站运维人员可以直观地看到局部放电点所在位置的声像云图<sup>[8]</sup>,从而实现了局部放电点的可视化定位。

1 声学成像技术方法和原理

1.1 声学成像技术

机械故障通常会因为异常振动引起辐射声场的

收稿日期:2025-06-11

作者简介:张凯峰(1991),男,硕士,工程师,从事变电运维工作。

变化,声学成像技术利用传声器阵列测量声音辐射的变化,并通过图像来显示空间中的声源分布,能够挖掘出故障状态下辐射声场的分布模式,因而能够更有效地定位和识别故障<sup>[9]</sup>。变电站高压设备的局部放电会产生各种物理特征,通常是设备表面或者内部产生微观放电,并伴随超声波的出现,设备老化、设备表面积灰等状况大多伴随着超声波局部放电信号。传统超声波局部放电检测方法难以准确定位缺陷位置,在现场实践过程中效果有限。

声学成像系统集成高灵敏度麦克风阵列、高清摄像头、信号调理模块及数据采集单元。麦克风按预设几何构型排布,实时捕获空间声场信息,同时摄像头同步获取对应场景影像;经信号调理模块对声学信号与视觉数据进行融合处理,最终将声源分布、强度等参数以可视化图像形式呈现,实现噪声源精准定位与空间声场动态映射,最终形成可视化的声学成像数据<sup>[10]</sup>。

## 1.2 声成像技术原理

根据 T/CSEE 0228—2021《变电站设备声成像测试技术规范》<sup>[11]</sup>,假设空间存在一个点声源,声源信号频率为  $f$ ,则声波到达传声器阵列的某一指定传声器与至其他传声器之间的时间差  $\Delta t_m$ ,可表示为:

$$\Delta t_m = (R_1 - R_m) / C \quad (1)$$

式中: $R_1$ 为声源到指定传声器的距离; $R_m$ 为声源到第  $m$  号传声器的距离; $C$ 为声音在空气中的传播速度。

不考虑环境中的噪声,则传声器阵列中任意一个传声器单元接收到的信号为:

$$X_m(t) = p(t)e^{j\omega\Delta t_m} \quad (2)$$

式中: $p(t)$ 为传声器接收到的声压幅值; $t$ 为时间; $\omega = 2\pi f$ 为声源的圆频率。

在基准发射面划分网格。假设每个网格点都为—个声源,对于网格中的任意一点  $s$ ,将所有传声器接收到的声压信号重构至该点,并叠加后的信号可表述为:

$$B(r,t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \Delta t_s) \quad (3)$$

式中: $M$ 为阵列中的传声器数量; $w_m$ 第  $m$  号传声器的加权系数; $p_m$ 为第  $m$  号传声器的声压值; $r$ 为重构点到传声器的距离; $\Delta t_s$ 为网格中  $s$  点上的声源到达传声器阵列的参考阵元与至其他阵元之间的时间差。

在现场定位时,需要对不同频段的声源进行过滤和筛选,所以需要进行频域处理,以取得所需要的声波,对

式(3)进行傅里叶变换后得到波束形成的频域表达式:

$$B(r,\omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m p(\omega) e^{j\omega(\Delta t - \Delta t_s)} \quad (4)$$

式中: $p(\omega)$ 为声压值在频域上的分量。

由式(4)可知,当  $\Delta t = \Delta t_s$  时,补偿后的各个信号具有相同的相位,加权求和后的输出值最大;当  $\Delta t \neq \Delta t_s$  时,补偿后的各个信号相位均不相同,求和时会相互抵消,输出值会减小。

当  $\Delta t = \Delta t_s$  时,波束形成输出最大值,并在声场分布云图中形成主瓣,即可认为点  $s$  为声源的位置。

频域计算之后,可得到基准发射面网格所有点对应的  $B(r,\omega)$ ,进而形成基准发射面上的声场分布云图,从而直观地确定声源具体位置。

## 2 实例分析

### 2.1 实例一

2025年05月29日,某变电站巡视人员在某 110 kV 变电站进行正常巡视中,听到 1 号主变 35 kV 母线桥间隔发出不均匀的“滋滋”放电声,伴随 1 号主变本体均匀的“嗡嗡”声,无法准确确定具体的放电位置。巡视人员利用 FOTRIC 338 型手持式红外测温仪,对母线桥间隔附近进行红外测温,也未发现温度有明显异常,红外测温图谱结果如图 1 所示。借助 HLDL-9909 型工业声学成像仪,对可能存在的放电位置附近进行定位检测,声学成像结果如图 2 所示。



图1 1号主变35 kV母线排电流回路红外测温图谱

从图1可得出,该1号主变35 kV母线排温度分别为 A 相 28℃、B 相 30℃、C 相 30℃,测试时环境温度为 22℃,三相相对温差较小,发热程度不明显,红外检测没有异常。

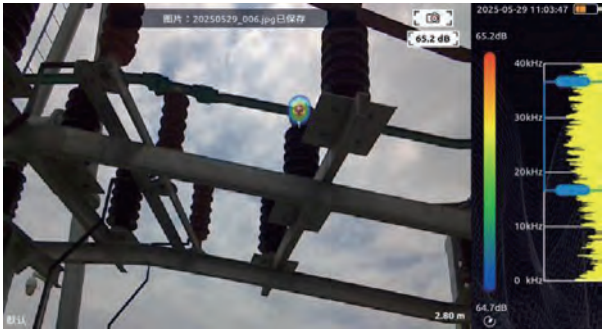


图2 1号主变35 kV母线排声学成像图谱

从图2可得出,该1号主变35 kV B相母线排与绝缘子连接处有较强的声源信号,成像设备直观显示出最强声源位置,最强信号强度为65.2 dB,放电位置非常明显。

对1号主变进行停电消缺。检查发现,1号主变35 kV B相母线排与绝缘子有放电痕迹,对其进行打磨紧固连接部件消缺处理。1号主变投入运行后没有异常声响,红外测温及声学成像仪也无放电显示。

分析认为,此1号主变35 kV B相母线排与绝缘子放电异常的原因为:1) 1号主变35 kV母线长期运行,承受来自出线回路的系统冲击。因为江西地区35 kV母线为环网运行,且10 kV和35 kV大客户用电,用户发生接地或短路对电源侧主变产生冲击;2) 施工工艺不佳,设备紧固不良;3) 主变压器及相关附属设备使用年限过长绝缘老化。

2.2 实例二

运维人员在变电站设备运维巡视期间,利用工业声学成像仪,发现多个变电站的异常放电进行缺陷定位,具体情况如表1所示。

表1 所辖变电站一次设备及异常定位点情况

日期	放电强度	放电位置	放电原因	处理办法
2025.05.30	55.6 dB	某110 kV变电站110 kV I段母线与1号主变110 kV侧1011刀闸A相母线侧T接处	线夹连接松动,存在微小间隙	打磨线夹,紧固连接,复测恢复正常
2025.06.02	64.2 dB	某220 kV变电站10 kV 994电容器组中叠式电抗器	电抗器绝缘老化	涂刷绝缘漆,复测恢复正常
2025.06.05	39.7 dB	某110 kV变电站某10 kV开关柜出线电缆头	绝缘破损	打磨绝缘化处理,复测恢复正常
2025.06.05	34.2 dB	某220 kV变电站#2主变220 kV侧2022动静触头	接触不良,大电流引起发热和放电	更换触头,复测恢复正常
2025.06.07	47.2 dB	某110 kV变电站35 kV 3311刀闸柜继保室	连接螺丝松动、接触不良	紧固松动连片,复测恢复正常

由表1可知,一次设备连接松动、接触不良和绝缘老化破损;二次设备接触不良是导致异常放电的主要原因。一二次设备的异常放电现象,如不及时处理

会造成设备击穿放电,导致设备损坏、保护动作等事故。户外一次设备因为长时间运行,设备运行环境复杂,老旧设备更容易发生绝缘破损,引起放电现象。

因此,在平时变电站巡视作业中,充分利用工业声学成像仪对一二次设备进行检测,特别是对老旧大负荷设备进行检测,能有效发现接触不良和绝缘老化等放电缺陷。

3 结语

通过以上实例分析可知,工业声学成像技术在变电站巡视维护中,对于缺陷初期不易发现的绝缘老化、接触不良等缺陷具有很好的定位作用。这种技术是对现有变电站巡视手段的有效补充,可帮助变电运行人员更准确地掌握变电站一二次设备的状态,为开展设备定位检修提供可靠的依据,针对性地对具体位置消缺,节省寻找缺陷时间,有助于推动设备尽快恢复运行。

参考文献:

[1] 伍惠铨,曾智斌,钟鉉州,等.红外测温在继电保护二次回路中的应用[J].江西电力,2024,48(02):13-15,19.

[2] 董德安.红外测温技术在变电设备运维中的应用研究[J].光源与照明,2021(04):43-44.

[3] 胡淑君.红外测温技术在变电运行中的应用[J].技术与市场,2020,27(12):105-106.

[4] 杨应仓,张斌山,陈俊德,等.局部放电理论及其检测方法研究[J].中国设备工程,2025(04):18-20.

[5] 赵勇军,廖圣,杨万锐,等.一起基于声学及红外成像检测技术的配电网架空绝缘导线缺陷案例分析[J].电气技术,2022,23(12):95-99.

[6] 万方,寻健,沈峰,等.一种手持式工业声学成像仪在架空线路巡视中的应用[J].电力与能源,2023,44(06):643-645.

[7] 柴莹.基于麦克风阵列的牵引变电所故障声源定位研究与应用[D].南昌:华东交通大学,2024.

[8] Ma H, Duan M, Yao C, et al. Application of acoustic imaging technology in power transformer condition evaluation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 617(01):012043.

[9] 王世元.声学成像技术在机械设备缺陷检测中的应用[J].电声技术,2024,48(10):36-38.