

DIANLI SHEBEI ZHUANGTAI JIANXIU YU GUZHANG ZHENDUAN JISHU  
XUESHU JIAOLIUHUI LUNWENJI

# 电力设备状态检修与故障诊断技术 学术交流会议论文集

中国电机工程学会测试技术及仪表专业委员会  
全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会 编  
国家电网运维检修技术标准专业工作组



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANLI SHEBEI ZHUANGTAI JIANXIU YU GUZHANG ZHENDUAN JISHU  
XUESHU JIAOLIUHUI LUNWENJI

# 电力设备状态检修与故障诊断技术 学术交流会论文集

中国电机工程学会测试技术及仪表专业委员会  
全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会 编  
国家电网运维检修技术标准专业工作组



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电力设备状态检修与故障诊断技术学术交流会论文集/中国电机工程学会测试技术及仪表专业委员会, 全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会, 国家电网运维检修技术标准专业工作组编. —北京: 中国电力出版社, 2015. 6  
ISBN 978-7-5123-7899-5

I. ①电… II. ①中…②全…③国… III. ①电力设备-状态修-学术会议-文集  
②电力设备-故障诊断-学术会议-文集 IV. ①TM407-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 131632 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2015 年 6 月第一版 2015 年 6 月北京第一次印刷

880 毫米×1230 毫米 16 开本 21.75 印张 667 千字

定价 200.00 元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

## 编写人员名单

彭 江	毕建刚	阎春雨	高克利	吴立远	陆 如
律方成	甄为红	杨 圆	唐伟杰	袁 帅	吴锦华
俞培祥	是艳杰	陈宝骏	陆国俊	姚森敬	杨 宁
王彦卿	常文治	付艳华	弓艳朋	张博文	雷红才
韩克存	赵 科	王刘芳	卢 萍	王 峰	高 飞
于钦刚	高 骏	黄 华	张国江	梁乃峰	张忠元
董立文	林国贤	姚陈果	刘庆时	邓彦国	岳国良
印 华	陈瑞国	方 琼	李会涛	汪晓明	

# 前言

随着我国经济社会发展，对电力设备运行的安全可靠要求也越来越高，如何及时防止设备故障和提高设备运行可靠性是电力企业设备运维人员最为关心的问题。在此背景下，近年来各种检测技术在运维检修工作中得到大量的推广应用，设备的状态评估与故障诊断水平不断提高。电力运维单位协同国内科研院所、仪器厂家通过状态检测及时发现设备缺陷，并实施针对性检修，显著提高了设备状态管控水平，积累了大量的现场经验和研究成果。

2014年10月份，中国电机工程学会测试及仪表专业委员会联合全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会、国家电网公司运维检修技术标准工作组在全国范围内组织开展了专题征文，内容包括在线监测、带电检测、状态评估与故障诊断、新型传感等方面，编写了《电力设备状态检修与故障诊断技术学术交流会论文集》。希望以此为该领域的技术人员提供交流平台，共同推动电力设备状态检修及故障诊断技术的发展。

本次论文征集工作共收到国家电网公司系统、云南电网公司、武汉大学、华北电力大学、青岛华电等共30多家单位投稿论文175篇，经过编委会专家的甄选和审核，共有66篇论文入选论文集。其中包括带电检测技术及应用18篇，在线监测技术及应用13篇，状态评估及故障诊断技术及应用24篇，传感技术研究6篇，其他技术5篇。本论文集可供从事电力设备状态检修与故障诊断技术领域的工作人员使用，也可供其他相关人员学习参考。

由于时间仓促，书中疏漏之处在所难免，望广大读者批评指正。

编者

2015年6月

# 目 录

前言

## 第一篇 带电检测技术

基于高频电流法的 10kV 电缆带电局放检测技术应用 .....	应高亮 张 波 卢晓峰 等	2
超高频法在 GIS 设备局部放电检测中的研究与应用 .....	余云钢 丰柏生	6
超高压运行复合绝缘子检测方法及其试验研究 .....	黄建峰 覃金彩 刘慧妍 等	10
一种便携式 XLPE 电缆绝缘检测装置的研制 .....	郝晓光 方 琼 付艳华 等	15
特高频检测定位法在开关柜局放检测过程中的应用 .....	万轶伦 周 毅 冯蓓艳 等	19
用于带电检测数据传输的无线网状网络系统的设计与应用 .....	陈 璐 黄 华 徐湘忆 等	25
基于 SF <sub>6</sub> 气体分解物检测系统设计与开发 .....	林海渊 林碧莺 张秀霞	29
GIS 局部放电声电联合检测法工程应用 .....	徐保友 杨卫国 王 森 等	34
基于移动机器人的零值(低值)绝缘子带电检测 .....	李隆基 王永福 吴明雷 等	38
超高频局放检测技术在固体绝缘设备中的应用 .....	吴 松 张 攀 何 博 等	43
开关柜局部放电带电检测技术在状态检修试验中的应用 .....	徐 康 陈 瑜 罗 恒 等	48
220kV 金属氧化物避雷器带电测试异常的处理 .....	杨 云	52
红外成像检漏技术在 SF <sub>6</sub> 断路器状态检修中的应用 .....	齐振忠 李建中 宁晋峰 等	55
长治电网输电线路在线监测系统应用分析 .....	何 强 陈永强 和文平 等	59
SF <sub>6</sub> 红外成像检漏技术在带电检测中的应用 .....	芦竹茂 俞 华 王天正 等	63
SF <sub>6</sub> 电流互感器缺陷带电检测方法的分析 .....	孙利朋 卢 杰 杨 柳 等	66
带电检测技术在避雷器状态诊断中的综合应用 .....	谢耀恒 黄 欣 乐耀璟 等	70
氧化锌避雷器带电检测技术有效性分析 .....	梅树棋 李志为 李群宾 等	74

## 第二篇 在线监测技术

变压器振动在线监测与线圈松动关联性的试验研究 .....	张国栋 李冬林 周长莒 等	80
浅析避雷器在线监测技术在变电站的运用 .....	方英儒	85
油中溶解气体在线监测装置性能分析 .....	马志青 周 瑜 马丽山 等	88
基于光电传感器的输电线路绝缘子状态监测 .....	齐伟强 聂卫刚 张玉佳 等	93
状态监测系统在 750kV 电抗器故障诊断中的应用 .....	陈宏刚 李 明 孙亚明 等	97
MOA 泄漏电流阻性分量的在线监测 .....	万轶伦 许晓波 都泓蔚 等	101
淄博高压电缆隧道多状态智能监测 .....	赵延华 蒋 涛 崔金辉 等	105

换流变音频在线监测系统可行性研究 .....	阴春晓 王 旗 周孝法	109
新泰 500kV 变电站在线监测系统优化研究 .....	刘颂菊 江 川 刘 杰 等	115
输电线路覆冰在线监测装置应用研究 .....	郭 谥 麻立群 资 斌	124
开关柜分布式智能监测系统的研制 .....	杨 林 聂卫刚 赵 璧 等	128
保护监控一体化智能中压开关设备的系统设计与实现 .....	杨 林 聂卫刚 赵 璧 等	131
变压器高频局放检测技术在北京市电力公司的研究和应用 .....	李 沛 程 序	135

### 第三篇 状态评估及故障诊断技术

微水微氧对 SF <sub>6</sub> 局放分解特征组分生成的影响及实验研究 .....	曾福平 唐 炬 张晓星 等	142
突出物绝缘缺陷下局部放电发展过程研究及特征信息提取 .....	董玉林 唐 炬 曾福平	150
涉及固体绝缘材料时 SF <sub>6</sub> 针—板缺陷下局部放电分解特性研究 .....	唐 炬 刘 欣 曾福平等	157
涉及有机绝缘材料时 SF <sub>6</sub> 局部过热组分生成规律 .....	唐 炬 黄秀娟 曾福平等	165
基于时频域谱图分类的局部放电特高频脉冲包络线识别研究 .....	郑 重 龚文博	170
基于频域介电谱的变压器老化状态评价 .....	于志诚 郑 重	176
劣化瓷绝缘子红外测温与性能检测技术研究 .....	陈 杰 刘 洋 周志成 等	180
基于马尔可夫过程和熵权模糊综合评价的变压器风险评估方法研究 .....	魏本刚 傅晨钊 李红雷 等	185
局部放电特高频检测综合干扰抑制算法的研究 .....	刘小兵 于国梁 时 翔 等	192
110kV 电缆终端气隙缺陷检测诊断与仿真研究 .....	陶诗洋 段大鹏 王文山 等	198
一起 750kV 主变压器内部短路故障分析 .....	李 山 何丹东 徐路强 等	205
基于极端学习机的变压器油中溶解气体预测模型 .....	潘征宇 黄帅栋 陈凯金 等	210
基于智能机器人巡检系统的设备数据分析方法的研究 .....	施海娃 黄致远 陈 佳 等	215
基于 BP 改进算法的变压器故障诊断 .....	黄帅栋 陈凯金 周建忠 等	220
带电检测与在线监测在特高压练塘站运维中的应用 .....	陆启宇 陈 璐 徐 鹏 等	226
双动型 SF <sub>6</sub> 断路器故障特性与故障分析 .....	赵 科 高 山 陈大兵	230
断路器首次分闸测试波形记录及分析技术 .....	史迈克 王琦凯	235
浙江电网 2014 年一次设备性能评估与劣化研究 .....	胡锡幸 王文浩	241
一起 220kV 氧化锌避雷器泄漏电流异常分析和处理 .....	罗茂嘉 钱珏臻 于 军 等	246
基于 GIS 的采空区输电杆塔倾斜趋势预测分析技术的研究与实现 .....	吴 琼 张航宇 于钦刚 等	250
基于多通道超声波法的开关设备交流耐压试验局放故障定位系统的研究与应用 .....	胡海敏 孙禹会	257
红外成像技术在变压器高压套管末屏接地故障诊断中的应用 .....	王文华 彭 飞 常晋兵 等	261
混合神经网络算法在 GIS 局部放电模式识别中的应用研究 .....	梁基重 庞玉龙 黄 明 等	266
基于 CVT 电容元件击穿的事故分析计算 .....	刘永鑫 王天正 俞 华 等	270

### 第四篇 传感技术

Au 掺杂 TiO <sub>2</sub> 纳米管阵列检测 SF <sub>6</sub> 分解组分的气敏性研究 .....	喻 蕾 张晓星 铁 静	276
基于 Taguchi 遗传算法的四频段微带单极子天线优化方法 .....	谭 巧 唐 炬 曾福平	283
一种基于纳秒脉冲响应法的变压器绕组变形测试方法研究 .....	王 建	289

套管末屏接地电流检测用小型化高频电流传感器的研制 .....	杨道文 朱太云 余国钢 等	295
基于超声波原理的变压器内部结构二维成像研究 .....	王志鹏 王天正 俞 华	299
基于变压器局部放电特高频传感器的布置 .....	王广真 郑书生 杨 宁 等	304

## 第五篇 其 他 技 术

基于大数据的输变电设备状态监测系统研究 .....	韩 笑 邓元婧 杨 宁	310
智能电网风险评估技术研究 .....	满玉岩 刘创华 张 弛 等	316
智能电力变压器一体化设计研究 .....	杨 宁 韩 笑 王鸿杰	321
带进线电缆对变压器进行介损及电容量测量的方法研究 .....	于 啸 吴世哲 郭宇维 等	326
浅谈完善提升输变电设备全面状态管理 .....	董艳唯 满玉岩 刘创华	330



第一篇

带电检测技术

# 基于高频电流法的 10kV 电缆带电局放检测技术应用

应高亮 张波 卢晓峰 卢鸣凯

(国网浙江省电力公司金华供电公司, 浙江省 金华市 321000)

## Research About Partial Discharge Characteristics of 10kV Xlpe Cable Joint'S Faults Based on High Frequency Current Method

YING Gao-lang, ZHANG Bo, LU Xiao-feng, LU Ming-kai

(State Grid Jinhua Power Supply Bureau, Jinhua City 321000)

**ABSTRACT:** The article introduces the principle of high frequency pulse current method to detect cable partial discharge. Proposed application points of the high frequency pulse current application of partial discharge detection technology. specially inspects and verifies the on-site application of high frequency pulse current method in partial discharge test by example.

**KEY WORDS:** 10kV XLPE cable; high frequency pulse current method; on-line detection

**摘要:** 介绍了高频电流法带电检测电缆局放的原理, 提出了当前高频电流带电局放检测技术的应用要点, 通过实例验证了该方法在电缆带电局放检测上取得了良好的现场应用效果。

**关键词:** 10kV XLPE 电缆接头; 高频电流法; 带电检测

## 0 引言

自 2011 年国家电网公司推行配网状态检修以来, 红外线测温、开关柜局放带电检测等带电检测技术得到了全面的应用, 但 10kV 电缆带电检测技术应用较为薄弱。10kV 电缆带电检测技术的匮乏, 造成电缆运行状态掌握困难, 严重制约了 10kV 电缆状态检修的开展。调查表明, 10kV 电缆 70% 以上的绝缘缺陷都是电缆接头绝缘缺陷<sup>[1]</sup>。局部放电是交联聚乙烯 (XLPE) 电缆绝缘劣化的主要表现形式和主要原因, IEC、CIGRE、IEEE 等国际电力权威组织都把局部放电检测作为 XLPE 电缆绝缘状况评价的首选手段。近年来, 国内诸多科研机构 and 检修单位对 10kV 电缆局放带电检测技术进行了较

为深入的研究和实践, 取得了一定的成果, 积累了有效的经验<sup>[2-5]</sup>。2012 年以来, 金华供电公司采用高频电流检测法对 10kV 电缆进行带电局放检测, 取得了良好的效果。

## 1 高频电流带电局部放电检测原理

高频电流带电局放检测是以电缆绝缘内部发生局放时伴随产生的高频电流脉冲为依据<sup>[6]</sup>, 使用宽频带传感器耦合局部放电信号。采用这种方法检测对电缆的传输性能无影响, 能检测到不失真的脉冲信号。传感器对低频分量不灵敏, 远处干扰源的干扰信号会沿着电缆传输时衰减, 检测灵敏度较高。高频电流带电局放检测原理见图 1。

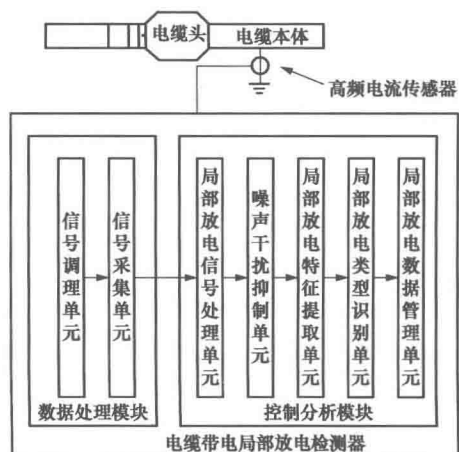


图 1 高频电流带电局放检测原理图

Fig. 1 High frequency partial discharge current charged detection principle diagram

文献<sup>[7]</sup>采用高频电流检测法对 5 类典型 XLPE 电缆接头缺陷模型进行了带电局放检测, 证明高频

电流带电检测法和传统离线局部放电检测法一样，能检测出所有电缆接头缺陷放电情况，验证了高频电流检测法带电检测电缆接头局部放电的有效性，并形成了差异性缺陷放电图谱，推进了10kV电缆局放带电检测的实用化。

## 2 高频电流带电局放检测应用技术要点

### 2.1 优化局部放电信号处理技术

采用增益与门限自适应技术以提高局部放电信号的处理能力。增益与门限自适应技术根据高频电流传感器在现场检测到的信号大小自动调整高频放大器增益和信号采样门限值，使放大后的高频信号处于大小适宜，使检测效果达到最佳状态。处理变换自适应放大后的高频信号，以脉冲峰值点的形式显示。增益与门限自适应技术原理框图见图2。

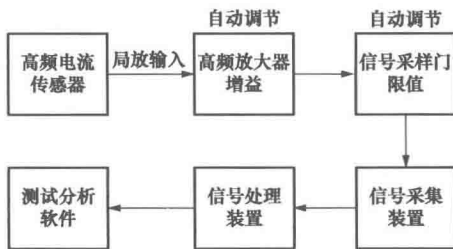


图2 增益与门限自适应技术原理框图  
Fig. 2 Gain and adaptive threshold technique principle block diagram

### 2.2 优化抗干扰技术

采用噪声门限控制与通道锁定技术来提高检测抗干扰能力。噪声门限控制与通道锁定技术设定合适的门限和通道锁定时间，在通道锁定时间内将自动屏蔽峰值高于门限的噪声信号，不会降低检测数据的处理速度，解决了分离噪声信号与提高检测数据处理速度相矛盾的难题。噪声门限控制与通道锁定技术原理框图见图3。

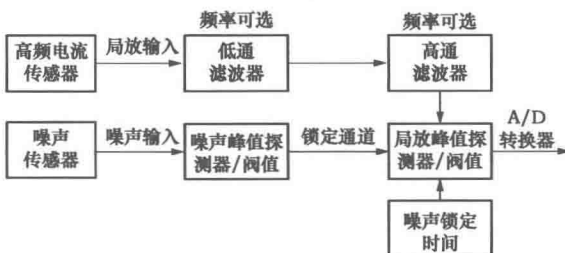


图3 噪声门限控制与通道锁定技术原理框图  
Fig. 3 The noise threshold control and channel locking technique principle diagram

### 2.3 研制大口径高频电流传感器

为解决某些电缆难以在开关柜内电缆头接地引线上装设高频电流传感器，进行带电局部放电检测

的难题，研制了大口径高频电流传感器，将内径由66mm加大到140mm，适用于YJV<sub>22</sub>-3×500mm<sup>2</sup>电缆及以下的电缆。在传感器不能安装在接地引下线上时，可将传感器可以直接安装在电缆本体上检测，拓展电缆高频电流带电检测法的应用范围。大口径高频电流传感器见图4。

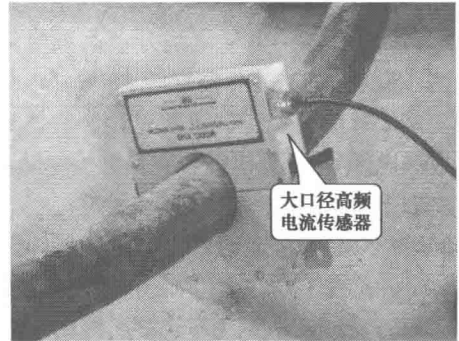


图4 大口径高频电流传感器图  
Fig. 4 Large caliber high frequency current sensor diagram

### 2.4 改造10kV电缆头接地装置

将原接于开关柜内的电缆接地线及电缆铠装层接地延长后改接至电缆层专用接地体。可将传感器安装在接地线上，提高检测精度。开关柜电缆接地引下线改造见图5。

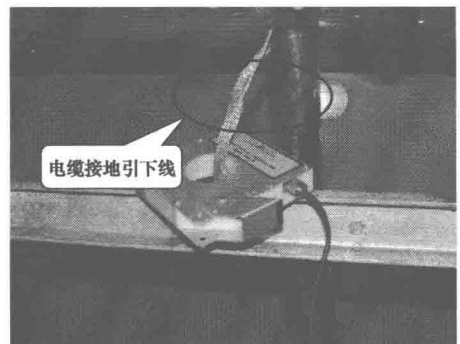


图5 开关柜电缆接地引下线改造图  
Fig. 5 Transformation diagram of switch cabinet cable grounding downlead

### 2.5 现场检测注意事项

2.5.1 进行检测时，检测目标及环境温度一般应高于5℃；户外试验应在良好天气进行，且空气相对湿度一般不高于80%。

2.5.2 现场检测时，高频电流传感器优先考虑安装在电缆接地线上（如图5），在无法安装在接地线上时采用大口径高频电流传感器安装在电缆本体上（如图4）。

2.5.3 检测局放信号时，应采取一定的技术措施，如可靠接地、避开干扰源、临时闭灯、关闭无线通信设备等，减少干扰信号。

2.5.4 电缆设备带电局放检测周期可依据电缆设备的重要性、负荷情况、环境条件、运行年数等综合考虑后确定。

### 3 高频局放检测实例

2012年以来,国网浙江省电力公司金华供电公司 对已运行的 240 条 10kV 电缆开展高频电流带电局放检测,发现 10kV 青年路联线 18 号杆电缆、耀华楼配电站 2 号配电变压器进线电缆、铁技校配电变压器进线电缆等 11 处电缆存在局部放电缺陷。

#### 3.1 案例 1

10kV 青年路联线 18 号杆电缆,型号为 YJV<sub>22</sub>-3×150mm<sup>2</sup>、长度 165m,对其采用高频电流带电局部放电检测的局放图谱见图 6。根据对测试图谱分析,信号在 0 和 180°两个 70°相位范围内有明显的信号团,相位差为 180°左右,信号团幅值为 600mV,且稳定存在。判断该电缆存在半导体层尖端放电和主绝缘气隙缺陷等情况。

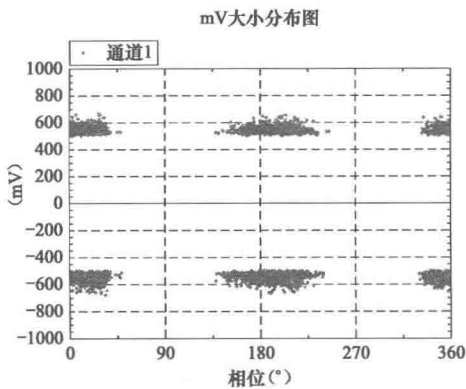


图 6 电缆局放幅值大小分布图谱  
Fig. 6 Cable partial discharge amplitude distribution map

将该电缆终端拆除后送至 3M 厂试验室进行解剖,发现电缆安装处理工艺粗糙,电缆外半导体层断口的处理工艺不到位,存在尖角、台阶(见图 7),电缆主绝缘表面存在刀痕(见图 8)等缺陷。解剖分析结果和带电检测结果相符。

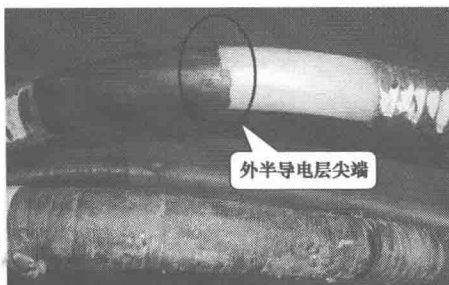


图 7 电缆外半导体层尖端  
Fig. 7 Cable outer layer of semi conductive tip

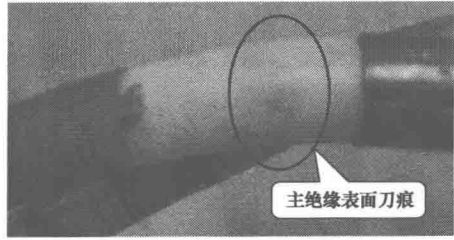


图 8 电缆主绝缘表面残留刀痕  
Fig. 8 Surface residual marks of cable main insulation

#### 3.2 案例 2

10kV 耀华楼配电站 2 号配电变压器进线电缆,型号为 YJV<sub>22</sub>-3×120mm<sup>2</sup>,长度 65m,对其采用高频电流带电局部放电检测的局放图谱见图 9。测试图谱表明,在 30°~120°、240°~330°范围内存在明显的信号团,且 2 个信号团相位差为 180°,电缆存在局部放电现象,比较接近绝缘表面导电颗粒放电。

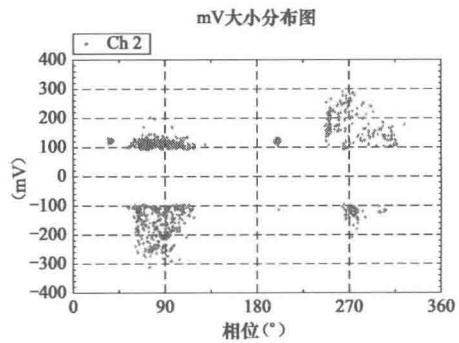


图 9 电缆局放幅值大小分布图谱  
Fig. 9 Cable partial discharge amplitude distribution map

通过停电检修,发现三相电缆终端头上都存在明显的局部放电痕迹,其中 A 相和 C 相的腐化放电痕迹最严重,见图 10。检修分析结果和带电检测结果相符。



图 10 电缆头放电痕迹图  
Fig. 10 Cable head discharge traces

### 4 结论

(1) 优化局部放电信号处理和抗干扰技术对提

高高频电流法带电检测电缆局部放电的有效性至关重要。

(2) 受电缆头接地装置影响,目前部分电缆不能在接地引线上开展高频电流法带电局放检测,应对接地装置进行改造,以提高电缆高频电流带电检测部放电的效率和准确。

(3) 当被检测的电缆不具备在电缆接地上检测局放时,可采用大口径高频电流传感器直接安装在电缆本体上进行局放的检测。

(4) 实践证明,高频电流法带电检测电缆局部放电有良好的检测效果。

### 参考文献

- [1] 姜芸, 闽虹, 罗俊华, 等. 中压交联聚乙烯电缆接头人工缺陷局部放电特性 [J]. 华东电力, 2010 (10): 1627-1629.
- [2] 孙波, 黄成军. 电力电缆局部放电检测技术探讨 [J]. 电线电缆, 2009 (3): 38-41.
- [3] 韦永忠, 沈海平. 电力电缆局部放电带电检测技术及其应用 [J]. 科技创新导报, 2011 (1): 61-62.
- [4] 朱海刚, 冯江, 罗俊华. XLPE 电力电缆局部放电

高频检测技术的研究 [J]. 高电压技术, 2004 (30): 75.

- [5] 任建柱. 电力电缆局部放电信号的检测技术 [J]. 数字技术与应用, 2010 (5): 71-72.
- [6] 黄海, 邓探宇. 电力电缆局部放电的多传感器联合检测 [J]. 电气技术, 2014 (8).
- [7] 应高亮, 张波, 卢晓峰, 等. 10kV 交联聚乙烯电缆接头缺陷局部放电特性的研究 [J]. 浙江电力, 2014 (3): 5.

收稿日期: 2014-11-30.

### 作者简介:

应高亮 (1958—), 高级工程师, 长期从事输变配电设备运维检修、技术监督、过电压保护等专业技术管理工作。浙江省金华市双溪西路 428 号, 电话: 13905798632;

张波 (1973—), 高级工程师, 长期从事配电网运维检修、技术监督等专业技术管理工作;

卢晓峰 (1980—), 工程师, 长期从事配电网设计、运行检修、技术监督等专业管理工作;

卢鸣凯 (1989—), 工程师, 从事配电网运维检修工作。

# 超高频法在 GIS 设备局部放电检测中的研究与应用

余云钢 丰柏生

(国网浙江省电力公司杭州供电公司, 杭州 310000)

## Research and Application of UHF Method on Detecting Partial Discharge in GIS

YU Yun-gang, FENG Bai-sheng

(Hangzhou Power Supply Company of Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310000)

**ABSTRACT:** Gas insulated switchgear(GIS)in twentieth Century 70 time metaphase appeared, It has the advantages of high reliability, compact structure, convenient operation and maintenance and other advantages, is widely used in electric power system. With the increase in the number of defects in GIS equipment also is found, the GIS equipment repair free point of view is broken, The partial discharge is one of the most common defects of GIS equipment. This paper uses UHF method for GIS equipment suspended discharge, common free particles discharge, air gap discharge, tip discharge are studied, and gives the detection map and empirical criterion. The practice proved that the UHF method for PD signal GIS equipment sensitive reaction and able to locate the defect position.

**KEY WORDS:** GIS; partial discharge; UHF; locate

**摘要:** 气体绝缘金属封闭组合开关设备(GIS)于20世纪70年代中期间世,具有可靠性高,结构紧凑,运行维护简便等优点,在电力系统中得到广泛应用。随着GIS设备数量的增加缺陷也时有发生,之前“GIS设备免维修”的观点也被打破,其中局部放电是GIS设备最常见的缺陷之一。本文采用超高频法对GIS设备常见的悬浮放电、自由颗粒放电、气隙放电、尖端放电进行了研究,并给出了检测图谱和经验判据。实践证明超高频法对GIS设备局部放电信号反应灵敏并且能够定位缺陷部位。

**关键词:** GIS; 局部放电; 超高频; 定位

## 0 引言

GIS具有可靠性高,结构紧凑,运行维护简便等优点,在电力系统中得到广泛应用。尤其是在土地资源紧张的市区GIS站更受欢迎,目前国网浙江省电力公司杭州供电公司新建的变电站多数采用GIS结构。截至2014年,国网浙江省电力公司杭州供电公司共有550kVGIS设备118台,220kVGIS设备1853台,110kVGIS设备5405台。随着GIS设备数量的增加缺陷也时有发生,之前“GIS设备免维修”的观点也被打破。由于GIS设备不同于传统电气设备可以直观地巡视检查;停电检修不如传统变电站方便奏效,很难发现隐蔽部位的缺陷;国网公司推行的状态检修模式对设备的检修周期也做了规定;因此,如何在线检测GIS设备的健康运行水平,尽早发现缺陷隐患已经成为当务之急。

传统的脉冲电流法可对测量系统进行标度,但是容易受到外部的电磁干扰,无法对局放源进行定位<sup>[1]</sup>,因而不能用于运行中GIS局放的在线检测。光学检测法对于GIS中诸多未知的放电源,其灵敏度就大受影响,而且成本很高,所以现场很少应用<sup>[2]</sup>。化学检测法检测时不受电气干扰的影响,但是从GIS气室内发生局放到由分析气体检测出问题的时间有延迟,并且分解产物会被吸附剂吸收,限制了在局放检测中的使用。相比之下超高频法和超声波法局部放电检测技术较为成熟在电力系统中的应用较为广泛。

本文以超高频传感器与高性能双通道示波器为



主要检测设备在 GIS 局部放电模拟平台上对悬浮放电、自由颗粒放电、气隙放电、尖端放电 4 种放电类型进行检测, 整理出 4 种放电类型对应的典型图谱, 并实现了缺陷点定位。

## 1 超高频检测法

GIS 设备由于设计或者安装工艺等原因不可避免地存在局部放电缺陷。GIS 中的局放一般发生在充满高压 SF<sub>6</sub> 气体的很小的间隙内, 而且局放时间极短 (ns 级), 迅速衰减湮灭。局放脉冲的上升前沿包含 1GHz 的电磁波, 这是由于 GIS 气室的共振作用, 形成多种模式的 UFH 谐振电磁波<sup>[3]</sup>。而 GIS 气室像一个低损耗的微波共振腔, 使得局放信号的振荡波在气室中的时间得以延长 (长达 1ms), 让安装在 GIS 上的传感器有足够的时间捕获这些信号。局部放电时产生的电磁波信号根据 GIS 的结构在内部反复进行传播、反射、干扰、延迟、衰减等过程, 通过盆式绝缘子放射到外界。使用高灵敏度的内置式或外置式传感器可以检测到频段在 300MHz~3GHz 的超高频谐振电磁波信号。传感器检测到的信号通过同轴电缆传递给信号处理装置, 通过对信号的处理和分析可以诊断出故障类型和故障部位。图 1 为 GIS 超高频法检测示意图。

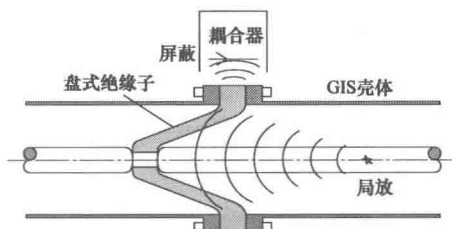


图 1 超高频法检测示意图  
Fig. 1 Schematic UHF detection method

## 2 GIS 典型放电类型分析与定位

### 2.1 GIS 设备局部放电的起因

电力设备的绝缘系统中, 只有部分区域发生放电, 而没有贯穿施加电压的导体之间, 即尚未击穿, 这种现象称之为局部放电<sup>[4]</sup>。它是由于 GIS 设备在设计或安装工艺上存在缺陷使得局部电场畸变、局部场强过于集中, 从而导致绝缘介质局部范围内的气体放电或击穿所造成的。它可能发生在导体边上, 也可能发生在绝缘体的表面或内部。导体上的毛刺, 悬浮屏蔽 (接触不良), 盆式绝缘子上的颗粒, 壳体上的毛刺, 自由移动的金属颗粒, 盆式绝缘子内部缺陷等这些缺陷是造成 GIS 设备局部

放电的主要原因<sup>[5]</sup>。

### 2.2 GIS 设备典型放电类型分析

(1) 悬浮放电。其又可分为固定间隙悬浮放电和可变间隙悬浮放电。特点: ①信号强, 脉冲幅值稳定, 脉冲间隔稳定, 高频含量多; ②间隙对称时, 正负半波对称, 间隙不对称, 正负半波不对称; ③放电脉冲集中在一、三象限。图 2、图 3 分别为悬浮放电连续波形和单个波形。图中 A 通道采集到的最大放电信号幅值为 1.16V, B 通道没有接入。

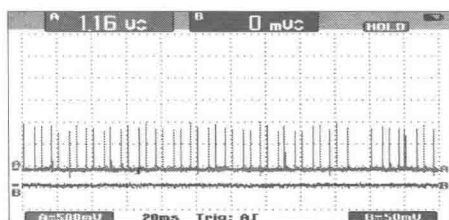


图 2 悬浮放电连续波形

Fig. 2 Suspended discharge continuous wave

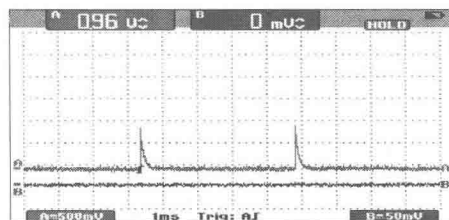


图 3 悬浮放电单个波形

Fig. 3 Suspension and discharge a single waveform

(2) 自由颗粒放电。特点: ①碰撞外壳产生的机械信号强, 电信号较弱; ②无固定相位特征, 幅值不稳定; ③通常最大信号出现在电压峰值处。图 4 为自由颗粒放电的连续波形。

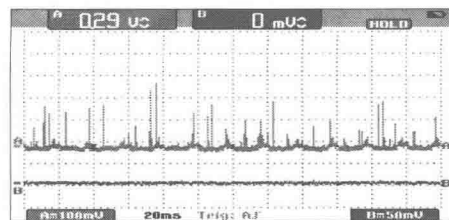


图 4 自由颗粒放电连续波形

Fig. 4 Freedom particle discharge continuous waveform

(3) 气隙放电。特点: ①脉冲幅值相对较小, 幅值变化大, 高频含量少, 间隔变化大; ②不规则气泡正负半波不对称; ③放电脉冲集中在一、三象限。图 5、图 6 分别为气隙放电连续波形和单个波形。

(4) 尖端放电。又可分为导体上的尖端放电和壳体上的尖端放电。特点: ①放电脉冲次数多, 信号最大值通常在电压峰值处; ②正负半波严重不对称; ③高频含量少。图 7、图 8 分别为尖端放电连续波形和单个波形。

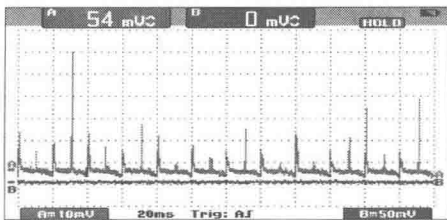


图5 气隙放电连续波形  
Fig. 5 air discharge continuous waveform

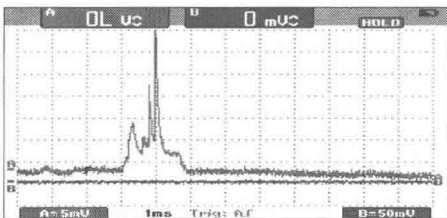


图6 气隙放电单个波形  
Fig. 6 Air Discharge single waveform

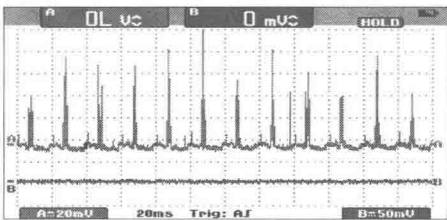


图7 尖端放电连续波形  
Fig. 7 Air Discharge single waveform

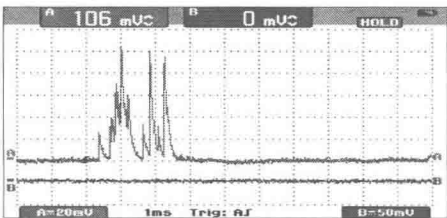


图8 尖端放电单个波形  
Fig. 8 Single point discharge waveform

### 2.3 GIS 设备故障点定位

实际现场检测时检测到局部放电的部位只占总检测部位很小比例,因此巡检时通常只需要用一个传感器单通道方式进行移动式检测。当发现某一GIS内部存在局部放电时,需要对故障点进行定位。首先通过移动超高频传感器寻找放电信号最大的气室,当确定放电气室之后在该气室两端分别安装超高频传感器。将2个传感器采集到的信号同时接入示波器,采用双通道模式进行检测。根据2个通道检测到同一放电信号的时间差可以计算出故障点距离其中一个传感器的距离。假设1号传感器与2号传感器之间的距离为 $L$ ,1号传感器与故障点的距离为 $l_1$ ,2号传感器距离故障点的距离为 $l_2$ ,电磁波在 $SF_6$ 中的传播速度可以近似认为是光速 $C$ 。则可以算出 $l_1 = (L - C\Delta t) / 2$ 。这套仪器定位精确可以达到10cm。图9为双通道采集到同一个放电部位的

信号波形。

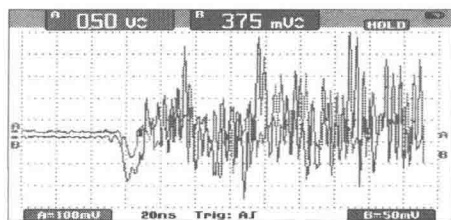


图9 双通道信号波形  
Fig. 9 Dual-channel waveform

## 3 超高频检测法现场应用

### 3.1 传感器的分类与特点

性能良好的超高频传感器<sup>[6][7]</sup>是超高频局部放电带电检测(在线监测)系统的关键,通常要求它能够准确检测GIS中由局部放电所激发的频率为300MHz~3GHz的电磁谐振波,并且具备抑制低频(300MHz以下)干扰的能力。根据传感器安装位置不同可以分为内置式传感器和外置式传感器两种。图10为内置式传感器与外置式传感器的安装部位示意图。

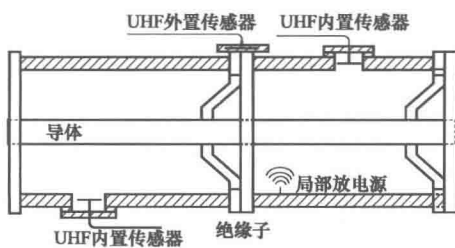


图10 传感器安装示意图  
Fig. 10 Sensor installation diagram

(1) 内置式传感器。内置式传感器一般安装在GIS检修手孔或观察窗部位的GIS内部。由于直接安装在GIS腔体内,内置传感器可获得较高的灵敏度并且不易受外界干扰信号的影响<sup>[8]</sup>(目前英国新制造的GIS均要求加装内置传感器)。但随着传感器与局放源的距离增大,信号衰减也较大(约2db/m),因此为了获得准确的测量值,沿着GIS设备至少每隔20m需要放置一个超高频传感器。同时对内置式传感器制造安装的要求较高,其使用寿命至少不能小于《输变电设备状态检修试验规程》中规定的GIS设备基准检修周期,一般为5~8年。特别是对早期设计制造的GIS安装内置传感器通常是不可行的,这时只能选择外置传感器。对内置传感器的基本要求是不应损害GIS的结构不影响GIS可靠运行,无论是使气体发生泄漏还是使内部场强增加都可能导致绝缘击穿。此外,如何对数量庞大的内置式传感器完成现场校验是一大难题。内置式传感器



能够连续不间断地监测 GIS 内部超高频信号因此通常被用于在线监测系统。

(2) 外置式传感器。外置式传感器一般安装在留有浇注开口的盆式绝缘子外部。相对于内置传感器,外置传感器<sup>[9]</sup>的灵敏度要差一些更容易受外界干扰信号影响,但安装灵活、不影响系统的运行、安全性较高,因而也得到了较为广泛的应用<sup>[9]</sup>。对于使用外置式传感器的 GIS 设备要求其盆式绝缘子不能完全屏蔽应当预留浇注开口用于安装外置式传感器。外置式传感器可以方便地拆装便于校验和更换。外置式传感器一般用于移动式带电检测对 GIS 进行短时检测,该方法一般只需要 2 个传感器。检测时将 2 个外置式传感器分别固定在临近的两个留有浇注开口的盆式绝缘子上,通过移动 2 个传感器可以实现对全站所有检测点的检测,也可以对故障点进行定位。

### 3.2 实测案例分析

2011 年 5 月,在对 110kV 某 GIS 站进行带电检测工作时超高频检测发现一间隔 B 相出线的三个盆式绝缘子处均检测到较强的超高频局放信号。随后用超声波法和 SF<sub>6</sub> 气体分解产物分析法均检测到可疑信号。检测小组给出了跟踪检测的决策建议,在之后的检测中发现信号强度逐步增大。经过相关部门研究决定对存在疑似信号的绝缘子进行解体更换处理。随后对更换的盆式绝缘子进行 X 光探伤、耐压、局部放电试验,发现有一个盆子内部存在一条长约 150mm、直径约为 2mm 的气泡。由于处理及时准确,避免了重大事故的发生。图 11 是故障盆式绝缘子解剖后的图片。

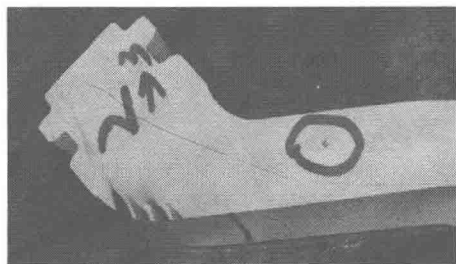


图 11 故障盆式绝缘子的解剖图  
Fig. 11 Fault basin insulator anatomy

## 4 结论

(1) 本文对 GIS 设备典型缺陷进行了分析,给出了 4 种基本放电类型的典型图谱,对实际应用具有指导作用。

(2) 国网公司的状态检修规程已经将超高频局放检测列为 GIS 设备例行带电检测项目。实际应用

表明超高频法局部放电检测能够及时发现 GIS 设备内部隐患,起到预防设备事故的作用。

(3) 超高频法对各种放电缺陷均较敏感,但不能发现弹垫松动、粉尘飞舞等非放电性缺陷,应当与超声波法和 SF<sub>6</sub> 气体分解产物分析法配合使用,相互佐证。

(4) 超高频法易受外部空间悬浮放电、手机信号、雷达信号、日光灯和马达影响,使用时需要对干扰信号进行辨识,基础谱图库需要丰富和完善。

### 参考文献

- [1] 肖燕,郁惟镛. GIS 中局部放电在线监测研究的现状与展望 [J]. 高电压技术, 2005, 31 (1): 47-49.
- [2] 黎大健,梁基重,步科伟等. GIS 中典型缺陷局部放电的超声波检测 [J]. 高压电器, 2009, 45 (1): 72-75.
- [3] 钱勇,黄成军,江秀臣,等. 基于超高频法的 GIS 局部放电在线监测研究现状及展望 [J]. 电网技术, 2005, 29 (1): 40-43, 55.
- [4] 彭超,雷清泉. 局部放电超高频信号时频特性与传播距离的关系 [J]. 高电压技术, 2013, 2: 7-12.
- [5] Tang Ju, Liao Hua, Zhang Xiaoxing, et al. Data fusion management system for GIS PD online monitoring [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (11): 63-66 (In Chinese).
- [6] 牛雪松,吕景顺,潘雄峰,等. 三相共筒式 GIS 局部放电检测的内置传感器研究 [J]. 传感器与微系统, 2013, 6: 53-56.
- [7] 李忠,张晓枫,陈杰华,等. 外部传感器超高频 GIS 局部放电检测技术 [J]. 西安交通大学学报, 2003, 37 (12): 1280-1283.
- [8] Shen Zhang, Xincan Zheng, Jinbin Zhang, et al. Study of GIS partial discharge on-line monitoring using UHF method [C]. International Conference on Electrical and Control Engineering, 2010: 4262-4265.
- [9] 金佳敏,俞培祥,潘益伟,等. 基于多种检测手段的 GIS 故障诊断实例分析 [J]. 浙江电力, 2013, 4: 43-45.

收稿日期: 2014-11-30。

作者简介:

余云钢 (1984—), 男, 本科, 技师, 主要从事电气设备带电检测工作, yyg286@163.com;

丰柏生 (1970—), 男, 本科, 高级技师、高级工程师, 主要从事电气设备管理工作。