

基于光纤传感器的高压绝缘设备局部漏电定位方法

彭涛

(广东电网有限责任公司 佛山供电局, 广东 佛山 528000)

摘要: 高压绝缘设备局部漏电信号微弱、特征不明显, 仅能说明是否有放电, 实际定位过程中存在漏判、误判的现象, 难以准确定位设备上存在的高压绝缘故障。为解决这一问题, 提出了基于光纤传感器的高压绝缘设备局部漏电定位方法。将高压绝缘设备生成的网络等效成集中参数模型, 建立高压绝缘设备局部漏电故障模型, 分析存在局部漏电故障的高压绝缘设备电流变化; 选择平面十字阵列布置光纤传感器阵列, 确定光纤传感器布置位置; 采集高压绝缘设备运行参数; 以光纤传感器发射的光纤与局部电流产生的“光弹效应”为依据, 通过故障模型中对地电容参数值变化和光纤传感器光相位的精准变化, 精准定位存在局部漏电故障的高压绝缘设备, 实现高压绝缘设备局部漏电定位研究。实验结果表明: 所提方法与对比方法相比, 研究方法设置的传感器布置方式能得到更加精确的高压绝缘设备运行参数、提高高压绝缘设备局部漏电定位准确度。

关键词: 光纤传感器; 高压绝缘; 绝缘设备; 局部漏电; 漏电定位; 定位方法

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24209

Local Leakage Location Method of High Voltage Insulation Equipment Based on Optical Fiber Sensor

PENG Tao

(Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan 528000, Guangdong, China)

Abstract: The local leakage signal of high-voltage insulation equipment is weak and its characteristics are not obvious, which can only explain whether there is discharge. There is a phenomenon of missing judgment and misjudgment in the actual positioning process, which is difficult to accurately locate the high-voltage insulation fault on the equipment. In order to solve this problem, a local leakage positioning method of high-voltage insulation equipment based on optical fiber sensor was proposed. The network generated by high-voltage insulation equipment was equivalent to a centralized parameter model, the local leakage fault model of high-voltage insulation equipment was established, and the current change of high-voltage insulation equipment with local leakage fault was analyzed. The plane cross array was selected to arrange the optical fiber sensor array and determine the layout position of the optical fiber sensor; the operating parameters of high voltage insulation equipment were collected. Based on the "photoelastic effect" generated by the optical fiber emitted by the optical fiber sensor and the local current, the high-voltage insulation equipment with local leakage fault can be accurately located through the change of the parameter value of the ground capacitance in the fault model and the accurate change of the optical phase of the optical fiber sensor, so as to realize the research on the local leakage location of the high-voltage insulation equipment. The experimental results show that, compared with the comparison method, the sensor layout set by the research method can obtain more accurate operating parameters of high-voltage insulation equipment and improve the accuracy of local leakage location of high-voltage insulation equipment.

Key words: optical fiber sensor; high voltage insulation; insulated equipment; local leakage; leakage location; positioning method

高压绝缘设备是保证电力系统供电安全和可靠运行的基础。当电力系统长时间运行时, 其电力设备会出现老化、遭受到外力破坏等问题,

损坏设备绝缘体、产生绝缘缺陷, 从而影响电力系统安全运行^[1]。因此, 需要研究高压绝缘设备漏电定位方法。目前, 我国一直实行普查式方

法,检测高压绝缘设备运行状态,以此推断定位高压绝缘设备存在的漏电故障,并针对故障位置进行维修^[1]。但随着智能电网的发展,这种检修方式已经难以满足智能电网高压绝缘设备检修结果的可靠性需求,亟需研究出可以更真实、更及时地反映出设备漏电位置的方法。基于此,相关学者提出如下研究观点,并取得了较多成果。

文献[3]方法针对目前电网设备存在的漏电问题,根据电网暂态与稳态运行过程,建立一体化模型,确定电网设备存在漏电故障时产生的故障信号,以此来实现漏电故障精准定位。该方法对漏电故障定位的准确度较高,但对漏电故障信号提取的速度较慢,存在定位耗时较长的问题。文献[4]方法采用MEMS工艺,以多孔式敏感膜片为原料,制作机电系统局部放电检测传感器,并验证了该传感器的应用性能。该方法采用传感器检测局部放电情况,提升了定位的有效性,但对传感器分布的位置需要进一步的改进。文献[5]、文献[6]分别引入了双光谱辐射特性理论和距离互相关算法,定位电力设备局部放电故障位置,但定位的效果不佳,需要进一步的完善。文献[7]引入人工智能技术,根据高压绝缘设备出现漏电故障时,产生的放电信号定位设备漏电故障。该方法定位信号中存在一定噪声需要抑制,否则影响定位的结果。文献[8]提出了一种基于振荡波局部放电检测的电力电缆故障定位方法。该方法通过局部放电装置以及根据电缆老化程度,对电缆放电的位置进行确定,该方法具有良好的适用性。文献[9]提出设计一种基于套管屏蔽环的开关柜脉冲电流法在线局部放电检测系统。该系统设计中借助开关柜提取套管中的脉冲,并根据配套检测阻抗完成漏电的定位。文献[10]设计了一种基于特高频自感知的变压器局部放电检测方法。该方法通过特高压天线感知模型对放电信号进行感知,并构建特高频信号的检测模型。该方法提升了电力设备安全运行,具有一定的可行性。

在上述相关学者研究的放电漏电检测定位成果基础上,此次研究提出基于光纤传感器的高压绝缘设备局部漏电定位方法。通过光纤传感器的设置以及光纤信号的提取,完成高压绝缘设备局部漏电定位。通过实验验证了所提方法的有效性。

1 基于光纤传感器的高压绝缘设备局部漏电定位方法

1.1 高压绝缘设备局部漏电故障模型构建

将高压绝缘设备生成的网络等效成集中参数模型,当该模型中的高压绝缘设备出现局部漏电故障时,其产生的电流是流经局部漏电高压绝缘设备的零序电流之和,基于此,可以生成如图1所示的故障模型。

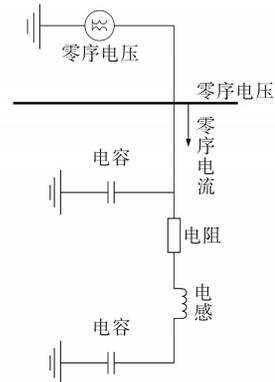


图1 高压绝缘设备局部漏电故障模型

Fig.1 Local leakage fault model of high-voltage insulation equipment

图1所示的模型属于零序网络,在这一网络中,可以将连接高压绝缘设备的线路对地电容设置为相等的值,即模型所有线路中对地电容值为网络任意对地电容值的50%。基于此,建立如下所示的模型方程:

$$U_0 = R_0 I_0 - R_0 C_i \frac{dU_0}{dt} + L_0 \frac{dI_0}{dt} - L_0 C_i \frac{d^2 U_0}{dt^2} + \frac{1}{C_j} \int_0^t I_0 dt - \frac{C_i}{C_j} U_0 \quad (1)$$

式中: U_0 为零序电压; R_0 为零序电阻; I_0 为零序电流; C_i 为模型中第*i*条支路的对地电容; L_0 为零序电感; C_j 为模型中第*j*条支路的对地电容^[11]。

依据式(1)所示的方程,即可得到图1所示的模型电流变化。基于此,引入光纤传感器,将其布置在高压绝缘设备生成的网络中,采集网络运行参数,以实现高压绝缘设备的漏电定位。

1.2 基于光纤传感器采集高压绝缘设备数据提取

1.2.1 布置传感器阵列

由于光纤传感器主要依靠光纤采集网络中的光信号,再通过传感器内部的光纤耦合器,将光信号转化为电信号,以此获取高压绝缘设备运行参数^[12]。基于此,在光纤传感器工作过程中,会受到传感器波长和布置位置、工作温度和压力4个

因素的影响。当光纤传感器未曾布置在最佳工作点时,受传感器本身波长限制,会直接影响传感器采集参数的灵敏度;当传感器工作温度每次波动达到10℃及以上,以及布置位置上下存在较大的压力差时,都会导致传感器出现非线性漂移。此外,工作环境中存在的噪声也会对传感器的光纤放大器、环形器等配件的性能噪声影响,导致光纤传感器采集到的信号产生较大的差异。为此,根据图1所示的高压绝缘设备局部漏电故障模型,选择平面十字阵列布置传感器阵列,将高压绝缘设备信号作为光纤传感器监测目标,记为 O ;假设每条线路上的阵元间距为 D ,则在 $D/2$ 的位置布置a,b,c,d 4个阵元。

由于光纤传感器采集信号强度、准确度会直接受到高压绝缘设备信号影响,因此,依据高压绝缘设备信号产生的波长 γ 确定 D 值,则存在:

$$\begin{cases} \gamma = v/\phi \\ D = \gamma/2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ϕ 为信号中心频率; v 为信号传播速度。

依据式(2)计算得到的 D 值,按照正时针旋转的方式,确定模型中4个阵元的位置。此时,4个阵元的中心位置即为光纤传感器采集高压绝缘设备运行参数位置。

1.2.2 获取高压绝缘设备运行参数

在上述布置的光纤传感器基础上,采集高压绝缘设备运行信号。其输出的光信号时域表达式如下式所示:

$$E(t) = \varphi \exp[j(2\pi\phi_0 t + \pi v_0)] \quad (3)$$

式中: $E(t)$ 为光场时域信号; φ 为光信号幅值; \exp 为取经验值函数; j 为信号虚数单位; ϕ_0 为初始光频率; v_0 为光纤传感器采集高压绝缘设备运行信号速率^[13]。

在此过程中,光纤传感器会受到网络中设备干扰影响,此时,传感器采集到的信号强度表达式为

$$Q = \frac{v_1 z \chi}{2} \sum E^2 \quad (4)$$

式中: v_1 为信号传播速度; z 为传感器光纤折射率; χ 为真空介电常数。

此时,光纤传感器采集到的信号为光信号,需要在传感器内部进行光电信号转换,通过滤波处理后,得到高压绝缘设备电信号,则存在:

$$\eta(t) = \sum \varphi_1 \cos[2\pi v_0 t_1 t + \lambda - \Delta\lambda(t)] \quad (5)$$

式中: $\eta(t)$ 为电信号; φ_1 为电信号幅值; t_1 为传感器采集信号所需要的往返时间; λ 为恒定相位;

$\Delta\lambda$ 为 λ 受到的干扰差值。

依据上述式(3)~式(5),即可通过光纤传感器获取高压绝缘设备生成的网络运行信号,此时只需要根据信号的变化情况,判断该网络中的高压绝缘设备是否存在局部漏电故障,并确定网络中存在局部漏电故障的高压绝缘设备位置。

1.3 高压绝缘设备局部漏电故障定位实现

若高压绝缘设备存在局部漏电故障,那么光纤传感器发射的光纤会与局部电流产生“光弹效应”^[14]。基于此,将根据图1所示的故障模型中对地电容参数值变化,判断高压绝缘设备是否存在局部漏电故障,则存在:

$$\begin{cases} \bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n C_l < 0 \\ C > 0 \text{ and } \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \frac{|C_l - C|}{|C|} > \delta \end{cases} \quad (6)$$

式中: \bar{C} 为对地电容平均值; n 为高压绝缘设备所处网络线路数量; C_l 为光纤传感器在第 l 条线路上得到的对地电容值; C 为网络中总对地电容; δ 为对地电容最大波动差值。

如式(6)所示的高压绝缘设备局部漏电故障判断公式,当网络满足 \bar{C} 的表达式时,表明网络中第 l 条线路上的对地电容平均值为负,表明该条线路上的高压绝缘设备处于负工作状态,可以直接判断该条线路上的高压绝缘设备存在局部漏电故障;当网络满足 C 的表达式时,表明网络中第 l 条线路上的对地电容变化剧烈,产生较大误差,此时也可以直接判断该条线路上的高压绝缘设备存在局部漏电故障。

由于网络中同一条线路上可以安装多个高压绝缘设备,所以将式(6)所示的判断依据记为一次判据。一旦网络中第 l 条线路上存在多个高压绝缘设备,需要在式(6)所示的一次判据基础上采用相位调制的方式,定位该条线路上存在局部漏电故障的高压绝缘设备,进行二次判断,从而达到精准定位存在局部漏电故障的高压绝缘设备。

基于此,将光纤传感器光相位的精准变化作为高压绝缘设备局部漏电故障二次判断依据。

假设只含有光纤的传感器实际光纤与参考光纤长度差一定时, $\eta(t)$ 才会具有已知频率,则与 $\eta(t)$ 同频率的正交参考信号 $\eta_1(t)$ 和 $\eta_2(t)$ 式为

$$\begin{cases} \eta_1(t) = \varphi_0(t) \cos(2\pi\phi t) \\ \eta_2(t) = \varphi_0(t) \sin(2\pi\phi t) \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\varphi_0(t)$ 为正交参考信号幅值； ϕ 为信号频率^[15]。将式(7)和式(5)进行正交运算，即先乘，后低通滤波，再微分，最后与式(7)相乘，最终得到如下所示的表达式：

$$\begin{cases} \eta'_1(t) = \frac{1}{4} \eta^2 \varphi_0^2 \sin^2[\lambda - \Delta\lambda(t)] \Delta\lambda(t) \\ \eta'_2(t) = \frac{1}{4} \eta^2 \varphi_0^2 \cos^2[\lambda - \Delta\lambda(t)] \Delta\lambda(t) \end{cases} \quad (8)$$

对式(8)得到的 $\eta'_1(t)$ 值和 $\eta'_2(t)$ 值，先进行除法运算，再进行积分运算，最终得到如下式所示的函数表达式：

$$r(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda_1(t) \cdot \lambda_2(t + t_1) dt \quad (9)$$

式中： λ_1, λ_2 分别为 $\eta_1(t), \eta_2(t)$ 相位差； $r(t)$ 为相位差的相关函数。

由式(9)所示的函数表达式可知，当 $r(t)$ 值达到峰值时，其所在的高压绝缘设备即存在局部漏电故障。

综合式(6)~式(9)计算过程，将根据高压绝缘设备所处网络实际情况，先后进行一次判据和二次判据，判断存在局部漏电故障的高压绝缘设备位置，从而实现高压绝缘设备局部漏电定位。

2 实验分析

为验证所提方法的可行性，进行实验分析。实验中选择基于套管屏蔽环的开关柜脉冲电流法在线局部放电检测系统(方法一)和基于特高频自感知的变压器局部放电检测方法(方法二)作为此次试验的对比方法，检测此次研究的局部漏电定位方法定位高压绝缘设备局部漏电故障准确度。三组方法定位高压绝缘设备局部漏电结果，将采用示波器展示，定位过程中的磁场变化，则采用特斯拉计测量设计的高压绝缘设备所处磁感应强度，以此提高实验精确度。

2.1 实验环境设计

根据此次试验选择的三组局部漏电定位方法，模拟的配电网如图2所示。

基于图2所示的配电网模拟图，设计的高压绝缘设备局部漏电故障位置，布置的传感器监测点如图3所示。

如图2所示的配电网模拟图，其线路1,2,3,4上的高压绝缘设备不存在局部漏电故障时，按照图3所示的传感器布置点，获取的线路正常电位值如表1所示。

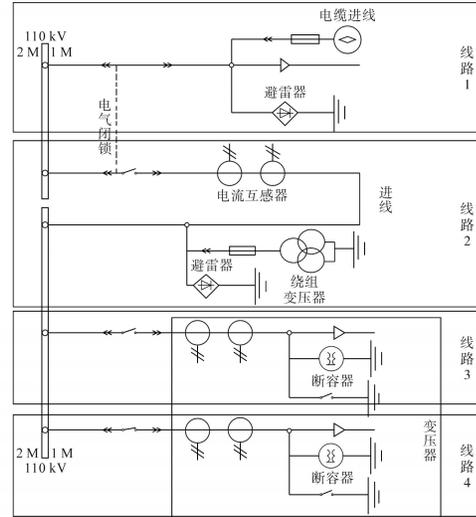


图2 配电网模拟图

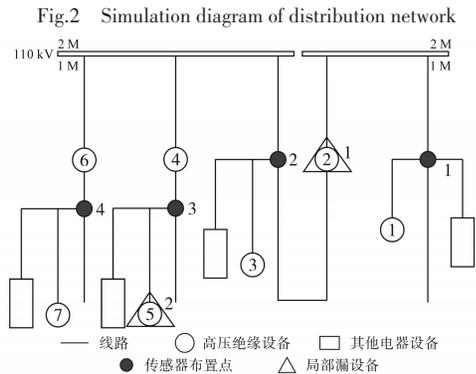


图3 高压绝缘设备局部漏电故障位置图

Fig.3 Location map of local leakage fault of high-voltage insulation equipment

表1 线路正常电位值

Tab.1 Line normal potential value mV

| 传感器高压绝缘设备 | 线路1 | 线路2 | 线路3 | 线路4 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 73.363 | 72.237 | 71.767 | 70.004 |
| 2 | 71.867 | 75.631 | 70.161 | 70.173 |
| 3 | 71.347 | 75.253 | 70.271 | 70.323 |
| 4 | 71.297 | 72.041 | 73.132 | 70.164 |
| 5 | 71.051 | 72.156 | 73.179 | 70.345 |
| 6 | 70.662 | 72.313 | 72.172 | 73.194 |
| 7 | 70.173 | 72.223 | 72.643 | 73.973 |

2.2 实验结果分析

根据此次试验设置的局部漏电位置，三组方法根据传感器采集到高压绝缘设备运行参数，得到的调制后电压幅度变化如图4所示。

基于图4所示的电压波形图，计算传感器监测电压幅值与正常电压幅值之间的电压变化率，则有：

$$P = \omega(A_i \cos m - B_i \sin \mu) * 100\% \quad (10)$$

式中： P 为电压变化率； ω 为电压变化幅度； A_i 为第*i*个高压绝缘设备正常电压值； μ 为传感器采集高压绝缘设备参数振幅； B_i 为第*i*个高压绝缘设

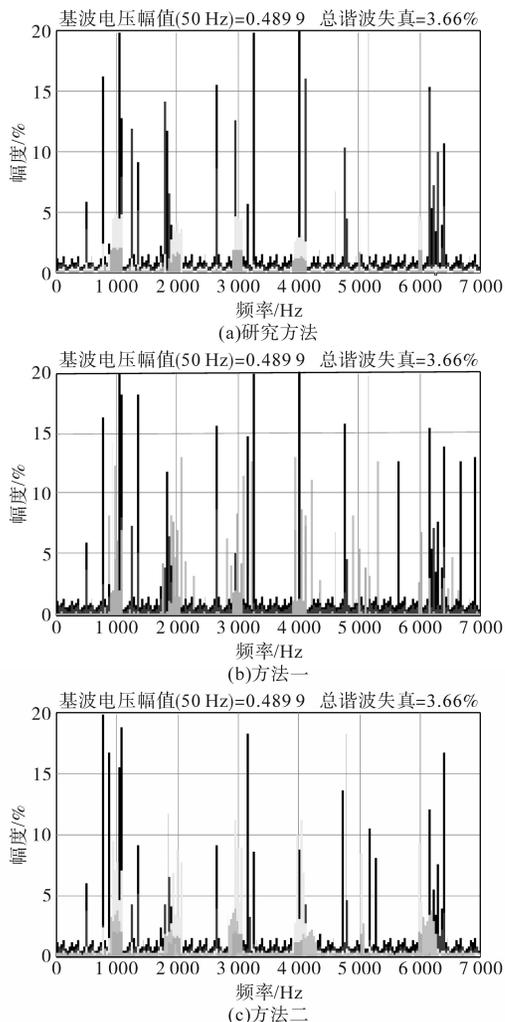


图4 三组定位方法监测电压波形图

Fig.4 Monitoring voltage waveforms of three sets of positioning methods

备实际监测电压值;*为卷积运算方式。

按照式(10)所示的计算公式,其得到的计算结果小于6%时,配电网线路电压处于正常波动。通过式(10)得到的计算结果如表2所示。

根据表2所示的电压变化率值,三组定位方法定位到的高压绝缘设备局部漏电故障位置如图5所示。

表2 配电网电压变化率

| Tab.2 Distribution network voltage change rate % | | | |
|--|-------|-------|-------|
| 传感器 | 方法 | | |
| | 方法一 | 方法二 | 研究方法 |
| 1 | 3.84 | 3.17 | 3.23 |
| 2 | 44.52 | 45.54 | 43.86 |
| 3 | 4.56 | 3.22 | 3.47 |
| 4 | 4.73 | 36.57 | 2.31 |
| 5 | 3.86 | 5.33 | 45.06 |
| 6 | 6.62 | 4.02 | 5.43 |
| 7 | 5.60 | 2.49 | 3.61 |

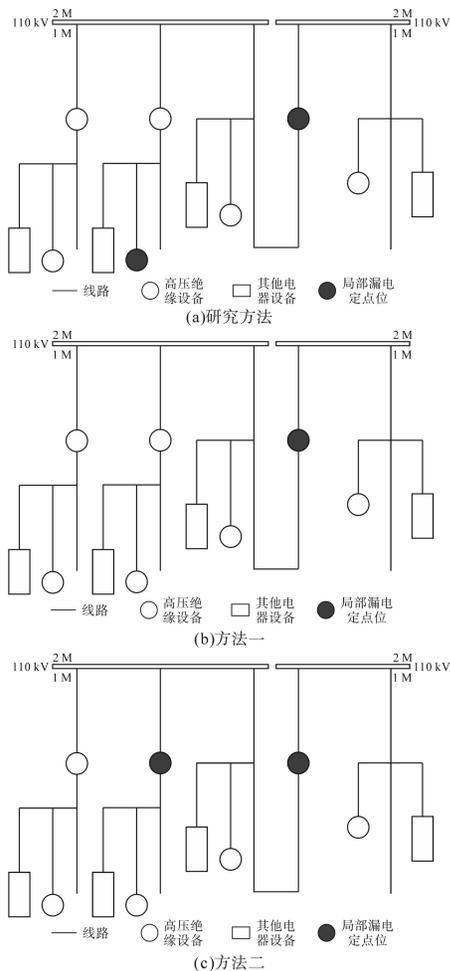


图5 高压绝缘设备局部漏电故障定位图

Fig.5 Local leakage fault location diagram of high-voltage insulation equipment

从图5b可以看出,方法一只识别出了一处高压绝缘设备局部漏电故障;从图5c可以看出,方法二定位高压绝缘设备局部漏电故障2位置时,出现了定位错误;而研究方法定位局部漏电故障位置与此次试验设置故障位置一致。由此可见,此次研究方法定位高压绝缘设备局部漏电故障时,具有更高的准确度,验证了所提方法的有效性。

3 结论

为满足高压绝缘设备局部漏电定位准确度需求,此次研究在前人研究基础上,引入光纤传感器采集高压绝缘设备运行参数,并综合考虑了影响光纤传感器运行因素,依据光纤传感器发射的光纤会与局部电流产生的“光弹效应”,定位存在局部漏电故障的高压绝缘设备,以此提高光纤传感器采集高压绝缘设备运行参数可靠度,从而达到提高高压绝缘设备局部漏电定位准确度的目的。经实验验证,此次研究的方法定位局部漏

电故障位置与此次试验设置故障位置一致,具有一定可行性。

参考文献

- [1] 袁玉和,刘亮,张洪涛,等. 锂离子电容器自放电检测方法研究[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 690-696.
YUAN Yuhe, LIU Liang, ZHANG Hongtao, et al. Study on self-discharge detection method of lithium-ion capacitors[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 690-696.
- [2] 刘宇舜,程登峰,殷巧玲,等. 基于EEMD与边际谱能量的电缆局部放电定位方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 156-164.
LIU Yushun, CHENG Dengfeng, YIN Qiaoling, et al. Cable partial discharge location method based on EEMD and marginal spectral energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 156-164.
- [3] 高宏杰,赵建文,郭秀才. 煤矿电网单相漏电故障区段自动定位探索[J]. 工矿自动化, 2021, 47(5): 106-111.
GAO Hongjie, ZHAO Jianwen, GUO Xiucui. Research on automatic location of single-phase leakage fault zone in coal mine power network[J]. Industry and Mining Automation, 2021, 47(5): 106-111.
- [4] 司文荣,傅晨钊,卜剑,等. 基于多孔式敏感膜片的MEMS光纤珐珀传感器及其局部放电检测[J]. 光学精密工程, 2021, 29(11): 2613-2621.
SI Wenrong, FU Chenzhao, BU Jian, et al. MEMS fiber optic Fabry-Perot sensors based on porous sensing diaphragms and applications for partial discharge detection[J]. Optical Precision Engineering, 2021, 29(11): 2613-2621.
- [5] 张弛,曹梦,何金,等. 基于双光谱辐射特性的绝缘异常放电检测方法研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(9): 79-85.
ZHANG Chi, CAO Meng, HE Jin, et al. Detection approach of abnormal discharges based on dual-spectral radiation characteristics[J]. Insulation Materials, 2021, 54(9): 79-85.
- [6] 周凯,饶显杰,汪先进,等. 基于距离的互相关算法在电力电缆局部放电定位中的应用[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2946-2954.
ZHOU Kai, RAO Xianjie, WANG Xianjin, et al. Application of distance-based cross-correlation algorithm in partial discharge location of power cable[J]. High Voltage Technology, 2021, 47(8): 2946-2954.
- [7] 陆云才,范路,陶风波,等. 人工智能在局部放电检测中的应用(一): 去噪与故障定位[J]. 绝缘材料, 2021, 54(5): 10-20.
LU Yuncai, FAN Lu, TAO Fengbo, et al. Application of artificial intelligence in partial discharge detection part 1: denoising and fault location[J]. Insulation Materials, 2021, 54(5): 10-20.
- [8] 李巍巍,白欢,吴惟庆,等. 基于振荡波局部放电检测的电力电缆绝缘老化状态评价与故障定位[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 147-151.
LI Weiwei, BAI Huan, WU Weiqing, et al. Evaluation and fault location of power cable insulation aging based on oscillation-wave partial discharge detection[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2021, 58(9): 147-151.
- [9] 刘鹏,潘越,王哲铭,等. 基于套管屏蔽环的开关柜脉冲电流法在线局部放电检测系统[J]. 水电能源科学, 2021, 39(2): 160-164.
LIU Peng, PAN Yue, WANG Zheming, et al. Pulsed current partial discharge online detection of switchgear based on bushing's shield ring[J]. Hydropower and Energy Science, 2021, 39(2): 160-164.
- [10] 蔡焱,袁文泽,张轩瑞,等. 基于特高频自感知的变压器局部放电检测方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2041-2050.
CAI Jun, YUAN Wenzhe, ZHANG Xuanrui, et al. Transformer partial discharge detection method based on UHF self-sensing[J]. High Voltage Technology, 2021, 47(6): 2041-2050.
- [11] 肖贵贤,严伟,李君. 基于ACO的低电压电力线漏电抗干扰监测仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(6): 56-60.
XIAO Guixian, YAN Wei, LI Jun. Simulation of anti interference monitoring of low voltage power line leakage based on ACO[J]. Computer Simulation, 2021, 38(6): 56-60.
- [12] 饶显杰,周凯,黄永禄,等. 考虑相速度频变特性的改进相位差算法局部放电定位[J]. 电工技术学报, 2021, 36(20): 4379-4388.
RAO Xianjie, ZHOU Kai, HUANG Yonglu, et al. Partial discharge location using improved phase difference method considering frequency-dependent characteristic of phase velocity[J]. Journal of Electrotechnical Technology, 2021, 36(20): 4379-4388.
- [13] 闫帅,李朋宇,王高洁,等. 基于特高频无线智能传感阵列的敞开式变电站放电定位方法[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 52-57, 65.
YAN Shuai, LI Pengyu, WANG Gaojie, et al. Partial discharge localization method based on uhf wireless sensor array in air-insulated substation[J]. China Electric Power, 2021, 54(2): 52-57, 65.
- [14] 司文荣,李泽春,熊朝羽,等. 基于MEMS光纤超声传感器的局放定位系统研制[J]. 传感技术学报, 2020, 33(10): 1522-1528.
SI Wenrong, LI Zechun, XIONG Chaoyu, et al. Design and development of partial discharge positioning system based on MEMS-on-fiber ultrasonic sensors[J]. Journal of Sensor Technology, 2020, 33(10): 1522-1528.
- [15] 吴志强,王德坤,赵海龙,等. 遏制电气火灾多发的阻性漏电检测技术分析[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(7): 991-993.
WU Zhiqiang, WANG Dekun, ZHAO Hailong, et al. Analysis of resistance leakage detection technology to prevent frequent electrical fires[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(7): 991-993.

收稿日期:2022-02-25

修改稿日期:2022-04-20