

高压 SF₆ 气体绝缘开关气室 局部放电在线监测研究

李永红

(河南对外经济贸易职业学院 信息工程学院, 河南 开封 475000)

摘要: 高压 SF₆ 气体绝缘开关气室检修过程中, 通常利用现场采集数据直接推导局部放电在线监测结果, 对噪声信号较为敏感, 导致在线监测结果表现出的平均精度 (Average Precision, AP) 值较低。因此, 提出基于改进小波阈值的高压 SF₆ 气体绝缘开关气室局部放电在线监测方法。以电平扫描比较原理为基础, 设计超高频局部放电监测传感器, 输出开关气室放电信号图谱。针对放电在线监测信号进行多尺度小波分解, 并引入改进阈值小波阈值算法去除信号中的干扰噪声。以干扰抑制后的测量信号为基础, 获取峰度、偏度等特征向量。输入生成对抗网络模型中展开不断学习, 获取局部放电在线监测结果。实验结果表明: 该方法所得监测结果的 AP 值达到了 0.9, 证明了其可以实现开关气室局部放电的准确监测。

关键词: SF₆ 气体绝缘开关气室; 局部放电; 超高频法; 改进小波阈值; 特征参量; 在线监测

中图分类号: TM591

文章编号: 1000-0682(2025)01-0098-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.01.018

Research on online monitoring of partial discharge in the gas chamber of high-voltage SF₆ gas insulated switch

LI Yonghong

(School of Information Engineering, Henan Vocational College of Foreign Economics and Trade, Henan Kaifeng 475000, China)

Abstract: During the maintenance process of the high-voltage SF₆ gas insulated switch chamber, on-site data collection is usually used to directly derive the online monitoring results of partial discharge, which is prone to interference from low-frequency noise signals, resulting in lower Average Precision (AP) values in the monitoring results. Therefore, a method for online monitoring of partial discharge in high-voltage SF₆ gas insulated switch chambers based on improved wavelet threshold is proposed. Based on the principle of level scanning comparison, design an ultra-high frequency partial discharge monitoring sensor and output a switch chamber discharge signal graph. Multi-scale wavelet decomposition is applied to discharge online monitoring signals, and an improved threshold wavelet threshold algorithm is introduced to remove interference noise from the signals. Extracting characteristic parameters such as kurtosis, skewness, and interrelationships from the signal spectrum after interference suppression, as the basis for partial discharge monitoring, and continuously learning them into the generative adversarial network model to obtain online partial discharge monitoring results. The experimental results show that the AP value of the monitoring results obtained by this method reaches 0.9, proving that it can achieve accurate monitoring of partial discharge in the switching chamber.

Keywords: SF₆ gas insulated switch chamber; partial discharge; ultra high frequency method; improve wavelet threshold; characteristic parameters; online monitoring

收稿日期: 2024-07-04

基金项目: 河南省职业教育教学改革研究项目: 信息技术在平面设计教学中应用的探究 (豫教(2019)17184 号)

第一作者: 李永红 (1972—), 女, 河南原阳人, 汉族, 硕士, 高级讲师, 主要从事计算机应用技术研究。

0 引言

电力系统的发展过程中,高压 SF_6 气体绝缘开关气室是一个重要的组成部分。在正常情况下,气室内的开关处于关闭状态,以隔离变压器和开关设备。当需要连接变压器和开关设备时,开关可以通过操作机构控制气室内的气体绝缘系统,实现开合操作。其内部一旦发生局部放电,不仅会加速设备的老化,还可能引发严重的电力事故^[1]。因此,对高压 SF_6 气体绝缘开关气室的局部放电进行在线监测,成为保障电力系统安全运行的重要环节。

韦湛兰等人提出的基于宽频带电流传感器的开关柜局部放电检测方法^[2],要求先标注出开关柜的电流互感器位置,并在此处布置宽频带电流传感器,采集设备运行局部放电监测信号。应用独立分量分析方法、经验模态分解方法充分处理放电信号,去除信号中的干扰噪声。获取信号集中度特征,代入改进高斯混合模型中,自动获取局部放电监测结果。但是,在存在强磁场或变频测试环境下,宽频带电流传感器采集数据中可能包含大量干扰信息,导致监测结果与真实情况相比存在较大误差。张晓新等人研究的基于特高频法的开关柜局放监测系统^[3],提出通过现场特高频段试验获取目标设备的放电测量信号,根据信号的时域和频域特征判断是否存在局部放电情况。但是,该方法对于低频段的放电信号可能不够敏感,导致一些低频放电现象被忽略,监测结果较为片面。苏志雄等人提出的基于脉冲电流和紫外脉冲的多源局部放电诊断方法^[4],结合了脉冲电流法和紫外脉冲法,获取设备局部放电检测所需的多方面数据,针对其提取局部放电信息特征,并通过 K 近邻算法、有向无环图支持向量机算法依次对特征向量进行处理,得到局部放电监测结果。但是,基于脉冲电流和紫外脉冲的联合检测需要处理和分析大量的数据,导致局部放电监测的实时性较差。Ghanakota K C 等人提出以超高频测量技术为基础的在线监测方法^[5],先开发具有共面波导馈电的紧凑型宽带传感器,将其连接到目标设备上,获取实时局部放电测量信号。通过数据处理、信号重建、特征处理、在线监测等多个环节,得出局部放电监测结果。但是,该方法的实施需要配备专门的设备,导致局部放电在线监测成本较高。

基于以上背景,提出了一种新型高压 SF_6 气体绝缘开关气室局部放电在线监测方法。应用特高频法采集开关气室局部放电信号,在改进小波阈值的

作用下提取信号特征,将其应用到后续生成对抗网络模型中,得到准确的局部放电在线监测结果。

1 设计高压 SF_6 气体绝缘开关气室局部放电在线监测方法

1.1 分散采集超高频监测传感信号

为了判断高压 SF_6 气体绝缘开关气室局部放电情况,提出运用超高频监测方法获取实时局部放电测量信号。超高频监测过程中,引入电平扫描式数据采集方法^[6],按照图 1 所示的电平扫描比较原理,对比实时测量局部放电信号和参考电平信号的电位,得到包含信号幅值特征和相位特征的放电图谱^[7]。

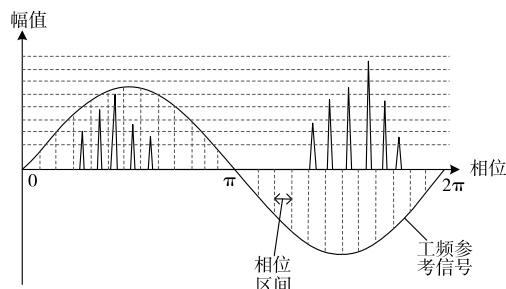


图1 电平扫描比较原理

以图 1 所示的电平扫描比较原理为基础构造一个信号比较器,再结合 D/A 转换、滤波电路等模块,组成数据采集单元,再连接层叠式多臂 Hilbert 分型天线^[8],得到图 2 所示的超高频局部放电监测传感器。

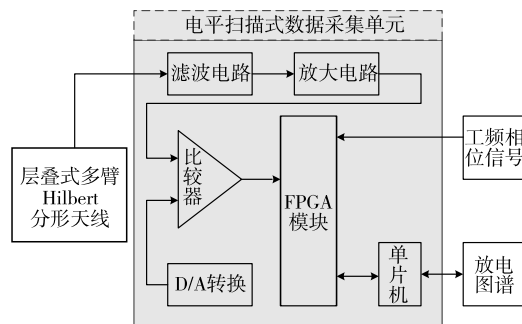


图2 超高频局部放电监测传感器

将超高频监测传感器分散安装到高压 SF_6 气体绝缘开关气室中,智能采集局部放电信号,作为后续放电在线监测的基础。

1.2 设计改进小波阈值干扰抑制算法

以抑制超高频监测信号中的干扰信息为目标,针对局部放电监测数据进行去噪处理,先应用多尺度小波分解算法^[9],将原始信号分解为多个子信号,具体的信号分解模式如图 3 所示。

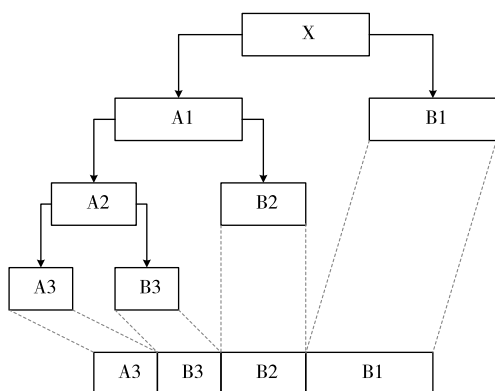


图3 三层小波分解示意图

依托于图3所示的三层小波分解技术处理局部放电监测信号后,最终得到一个低频信号和三个高频信号。考虑每个尺度分解小波信号在整个小波域上的分布情况,给定一个适当的阈值,作为判断噪声信息的依据^[10]。为了提升干扰噪声检测质量,结合通用阈值和 Heursure 混合阈值计算公式,求出可用

$$\hat{\psi}_{o,k} = \begin{cases} \psi_{o,k} - \frac{\varepsilon_2(o)}{2} \left[\varepsilon_2(o) \psi_{o,k}^{-1} + G \cdot \frac{I(\psi_{o,k})}{(|\psi_{o,k}| - \varepsilon_2(o)) + G - 1} \right], & |\psi_{o,k}| \geq \varepsilon_2(o) \\ 0, & |\psi_{o,k}| < \varepsilon_2(o) \end{cases} \quad (3)$$

式中: ψ 表示未考虑噪声影响的小波系数; $\hat{\psi}$ 表示改进小波系数; o, k, G 分别表示分解层数、分解尺度和调节系数; I 表示符号函数。

改进小波阈值函数的提出,克服了硬阈值函数的不平滑问题和软阈值函数计算差值问题,极大提升了信号重构精度。通常小波空间内高尺度信息中涵盖了局部放电信号,低尺度信息中包含更多噪声,基于这一特点构建改进小波阈值求解目标函数,如公式(4)所示:

$$f(x) = x - \frac{\varepsilon_2(o)}{2} \varepsilon_2(o) \cdot x^{-1} + G \cdot \frac{I(\psi_{o,k})}{(|\psi_{o,k}| - \varepsilon_2(o)) + G - 1} \quad (4)$$

式中: x 表示输入信号; f 表示改进小波阈值求解目标函数。

通过对公式(4)求解,得到更加符合干扰抑制要求的改进小波阈值,应用其筛选出有意义的传感器测量信号,凸显局部放电特征。

1.3 提取局部放电监测信号特征参量

面向干扰抑制后的局部放电测量信号进行分析,获取信号包含的大量特征参量,得到高压 SF₆ 气体绝缘开关气室局部放电判断依据。首先,将预处理后的测量信号图谱均分为 12 等份,计算每个区间内放电脉冲数占比,考虑相位和幅值的区间长度,得

于改进小波阈值干扰抑制的阈值。

$$\varepsilon_1 = \sigma \sqrt{2 \ln(n)} \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \begin{cases} \varepsilon_1, & \frac{\beta - n}{n} \leq \frac{\log_2 n^{3/2}}{\sqrt{n}} \\ \min(\varepsilon_1, \varepsilon_2), & \frac{\beta - n}{n} > \frac{\log_2 n^{3/2}}{\sqrt{n}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别表示通用阈值和 Heursure 混合阈值; σ 表示测量信号噪声均方差; n 表示小波系数总量; β 表示小波系数平方和; \ln 表示自然对数; \log 表示一般对数; \min 表示最小值取值函数。

依托于给定阈值,判断每个尺度小波分解信号中包含的噪声信息,保留除干扰噪声以外的其他信号,并在考虑信号边缘局部特征的情况下实现多尺度小波信号的重构^[11],得到具有良好平滑性的信号图谱。以提升信号重构质量为目标,构造公式(3)所示的改进小波阈值函数。

出测量信号图谱包含的相位-幅值区间分布特征。

运用统计学概念,定义峰度、偏度计算公式,获取这两方面信号特征,用以反映数据正态分布特点和数据分布对称程度^[12]。

$$K = \sum_{j=1}^m \frac{[\eta(j) - \tau]^4}{m \times \vartheta^4} \quad (5)$$

$$S = \sum_{j=1}^m \frac{[\eta(j) - \tau]^3}{m \times \vartheta^3} \quad (6)$$

式中: K 表示峰度; S 表示偏度; m 表示分解后得到的局部放电信号数量; j 表示分解信号编号; η 表示信号数据序列; τ 和 ϑ 表示平均值和方差。

对比信号曲线的正半轴和负半轴的相似性,推导出信号互相关系数,作为最后一项特征参量。

$$r = \frac{\sum_{j=1}^m [\eta(j) - \bar{\eta}][\mu(j) - \bar{\mu}]}{\sqrt{\sum_{j=1}^m [\eta(j) - \bar{\eta}]^2 \sum_{j=1}^m [\mu(j) - \bar{\mu}]^2}} \quad (7)$$

式中: r 表示互相关系数; μ 表示负半轴数据集; $\bar{\eta}$ 和 $\bar{\mu}$ 表示正负半轴数据均值。

1.4 生成局部放电在线监测网络模型

获取局部放电监测信号特征参量后,将其看作输入样本。再引入生成对抗网络,通过生成器和判别器,对输入样本进行深入分析,获取局部放电监测结果。

考虑到生成对抗网络生成器扩充样本时,无法充分考虑目标需求,引入卷积神经网络优化生成对抗网络。该情况下,生成器损失函数计算公式为:

$$L = -E_{\tilde{\omega} \sim P_1}[\Gamma(\tilde{\omega})]$$
 (8)

式中: L 表示生成器损失函数; E 表示数学期望; $\tilde{\omega}$ 表示生成样本; P_1 表示生成样本灰度分布; Γ 表示可微函数。

判别器损失函数计算公式为:

$$L' = QE_{\omega \sim P_2}[(\|\nabla_{\omega'}\Gamma(\omega')\|_2 - 1)^2 - E_{\tilde{\omega} \sim P_1}[\Gamma(\tilde{\omega})] - E_{\omega \sim P_2}[\Gamma(\omega)]]$$
 (9)

式中: L' 表示判别器损失函数; Q 表示正则化指数; ω 表示真实样本; ω' 表示随机差值; P 表示灰度值; P_2 表示真实样本的灰度分布; ∇ 表示梯度下降系数。

其中:

$$\omega' = R\omega + (1 - R)\omega$$
 (10)

式中: R 表示随机参数。

将信号特征参数注入基于生成对抗网络的在线监测模型中,与参考标签进行对比,判断出当前高压 SF₆ 气体绝缘开关气室是否存在局部放电缺陷,并识别出具体的放电标签。

2 实验

以成都东变电所内 27.5 kV 高压 SF₆ 气体绝缘开关气室作为研究对象,运用新提出方法对该设备局部放电情况进行在线监测,观察设备实时运行状态。针对高压 SF₆ 气体绝缘开关气室组成结构进行观察,得到图 5 所示的现场图像。

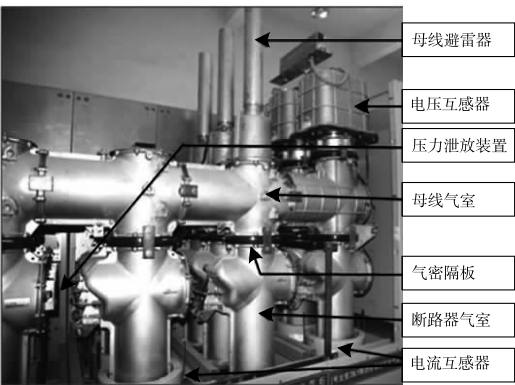


图 5 高压 SF₆ 气体绝缘开关气室背面图

从图 5 可以看出,该高压 SF₆ 气体绝缘开关气室组成结构复杂,包含电压互感器、压力泄放装置、气密隔板等模块单元。在该开关气室上分散安装超高频局部放电监测传感器,采集大量测量信号,得到实验数据集。

设置母小波为 dB4,运用四层小波分解结构处理对图 6 所示的原始信号。

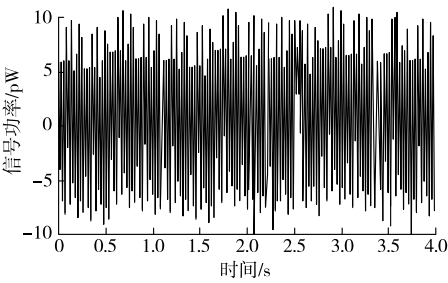


图 6 含噪局部放电测量信号

结合改进小波阈值概念处理小波分解信号中的干扰信息,并实现干扰抑制信号的重构,得到图 7 所示的去噪效果。

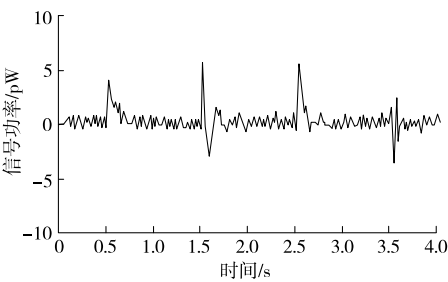


图 7 改进小波阈值去噪处理后的信号波形图

从图 7 可以看出,噪声干扰抑制极大削减了原始测量信号的能量,凸显出原始信号中的突变信号,将其应用到后续特征参量提取和局部放电监测过程中,提升监测质量。

针对基于生成对抗网络的局部放电在线监测模型,设置其相关参数如表 1 所示。

表 1 模型参数

参数类别	参数名称	取值
模型架构	网络类型	CNN - GAN
	隐藏层数量	3
	隐藏层单元数量	128
	激活函数	ReLU
	丢弃率	0.2
	优化器	Adam
优化设置	学习率	0.001
	批大小	64
	迭代次数	200
	损失函数	交叉熵损失
	条件损失权重	0.5
其他	正则化系数	0.000 1

在上述参数条件下,应用大量实验数据对该模型进行训练,将模型工作性能调整到最优。经过 200 次迭代处理,得到图 8 所示的损失值、准确率变化曲线。

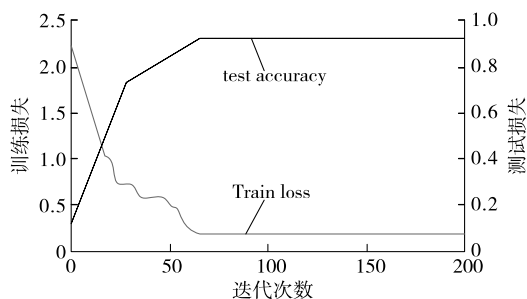


图7 模型训练过程

如图8所示,经过60次迭代训练模型就收敛到了最优状态,此时监测模型损失值低于0.2,输出监测结果的准确率达到0.93。

应用训练好的局部放电在线监测网络模型,进一步分析超高频测量信号变化特点,得到成都东变电所高压 SF₆ 气体绝缘开关气室的局部放电情况,最终确定在 0.5 s、1.5 s、2.5 s 和 3.5 s 分别出现了一次放电信号,但都未持续太久,证明其不属于严重局部放电现象。

将基于宽频带电流传感器的方法、基于脉冲电流和紫外脉冲的方法,依次应用到高压 SF₆ 气体绝缘开关气室局部放电在线监测过程中,统计各方法监测结果对比真实局部放电状态,绘制得到图9所示的精确召回率 (Precision - Recall, PR) 曲线。

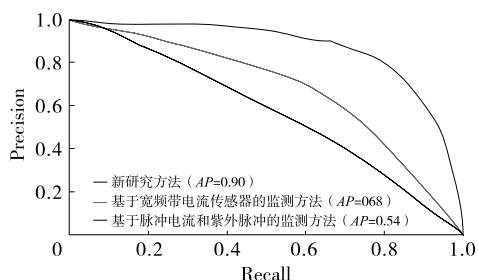


图9 不同方法监测结果 PR 曲线

根据 PR 曲线下方面积,可以确定各方法监测结果的 AP 值,这一指标可以用来直接评估每种方法局部放电监测结果的准确程度。新研究方法在线监测结果的 AP 值达到了 0.9,相比另外两种方法提升了 24.44% 和 40%,更加准确地反映了高压 SF₆ 气体绝缘开关气室局部放电情况。

3 结束语

针对基于改进小波阈值的高压 SF₆ 气体绝缘开

关气室局部放电在线监测的成果进行总结可以发现,改进小波阈值算法的引入,显著提高了局部放电信号的检测精度和可靠性,为电力系统的稳定运行提供了重要保障。

参考文献:

- [1] 李旭,王文森,郭丽,等. 基于多传感器融合的电力变压器内部放电定位与辨识技术[J]. 电网与清洁能源, 2024,40(03):22-31.
- [2] 韦湛兰,李鹏. 基于宽频带电流传感器的开关柜局部放电检测方法研究[J]. 传感技术学报,2024,37(03):545-550.
- [3] 张晓新,刘莹莹,林峰,等. 基于特高频法的开关柜局放监测系统研究[J]. 电力电子技术,2023,57(06):42-45+81.
- [4] 苏志雄,孙康,丁浩,等. 基于脉冲电流和紫外脉冲的多源局部放电诊断方法[J]. 绝缘材料,2024,57(01):101-108.
- [5] Ghanakota K C, Yadam Y R, Ramanujan S, et al. Study of ultra high frequency measurement techniques for online monitoring of partial discharges in high voltage systems [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(12):11698-11709.
- [6] 刘东超,陈志刚,崔龙飞. 基于物联网的环网柜在线监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(20):60-67.
- [7] 戴昕宇,徐焕宇,张宁. 移动端卷积神经网络开关柜局部放电样本生成与检测[J]. 电子测量技术,2022,45(12):141-147.
- [8] 罗颖婷,江俊飞,王磊,等. 基于微观和统计信息的 GIS 局部放电定位技术[J]. 电子测量技术,2022,45(13):71-76.
- [9] 周秀,吴旭涛,汲胜昌,等. 基于空间电容耦合原理的局部放电检测方法及其传感器研究[J]. 高压电器, 2022,58(04):63-69.
- [10] 贺建明,刘坚钢,易非凡,等. 开关柜绝缘故障仿真与检测系统研究[J]. 高压电器,2022,58(03):23-28.
- [11] 江友华,朱毅轩,江相伟,等. 基于改进 LMS 自适应滤波的局部放电噪声抑制方法[J]. 科学技术与工程, 2022,22(03):1039-1047.
- [12] 方义治,林钰灵,梁育雄,等. 基于数字孪生的 GIS 外部局部放电干扰识别[J]. 广东电力,2024,37(01):94-101.