

计及噪声辐射特点的中小型变压器噪声高速同步定位技术*

张佳成¹ 郑中原¹ 于金山¹ 张滢恒² 闫立财³ 张佃卯³

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院 天津 300392; 2. 国网天津市电力公司建设分公司 天津 300143;

3. 紫光软件系统有限公司 北京 100084)

摘要:与大型变压器不同,中小型变压器是一种利用电磁感应原理改变交流电压的装置,在运行中会产生各种噪声,为了确定噪声的位置,提出了一种计及噪声辐射特点的中小型变压器噪声高速同步定位技术。在辐射条件下,计算变压器噪声的格林函数,通过建立变压器噪声边界的积分方程,计算变压器噪声辐射声压。利用流体力学方程,描述变压器噪声辐射的波动情况,根据空气与变压器噪声耦合的有限元方程,建立变压器噪声传播的过程方程,分析变压器噪声的传播机理。通过噪声信号的分解,利用有限元分析得到变压器中噪声信号的有限元函数,根据噪声信号的频域分量,计算噪声信号的四阶谱累计量,结合噪声信号的谱度,实现变压器噪声的定位。实验结果表明,该技术能够确定变压器中噪声的位置,并将定位精度提高到90%以上。

关键词:噪声辐射特点;同步定位;传播机理;辐射声压;噪声定位

中图分类号: TB532;TN773 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.25

High-speed synchronous noise location technology for small and medium-sized transformers considering noise radiation characteristics

Zhang Jiacheng¹ Zheng Zhongyuan¹ Yu Jinshan¹ Zhang Fuheng² Yan Licai³ Zhang Dianmao³

(1. State Grid Tianjin Electric Power Research Institute, Tianjin 300392, China; 2. State Grid Tianjin Construction Company, Tianjin 300143, China; 3. Unis Software System Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: Different from large transformers, small and medium-sized transformers are devices that use electromagnetic induction to change AC voltage, which will produce various noises in operation. In order to determine the noise location, a high-speed synchronous noise location technology for small and medium-sized transformers considering noise radiation characteristics is proposed. Under the radiation condition, the Green's function of transformer noise is calculated, and the radiated sound pressure of transformer noise is calculated by establishing the integral equation of transformer noise boundary. The propagation process of transformer noise radiation in air is described by using hydrodynamic equation. According to the finite element equation of coupling between air and transformer noise, the process equation of transformer noise propagation is established and the propagation mechanism of transformer noise is analyzed. Through the decomposition of noise signal, the finite element function of noise signal in transformer is obtained by finite element analysis. According to the frequency domain component of noise signal, the fourth-order spectral cumulant of noise signal is calculated, and the noise of transformer is located by combining the spectral degree of noise signal. The experimental results show that the technology in this paper can locate the noise in the transformer and improve the positioning accuracy to more than 90%.

Keywords: noise radiation characteristics; synchronous positioning; communication mechanism; radiation sound pressure; noise localization

收稿日期:2024-09-04

* 基金项目:国网天津市电力公司科技项目(KJ22-1-34)资助

0 引言

为了提高城市电网运行的可靠性、改进电网运行品质、降低输电损失,有必要在城区建设一个大规模的低压变电站^[1]。电力系统中,变压器发出的噪声会对居民产生影响,通过对变压器进行降噪处理,可以保证居民不受噪声的影响。电能是我国重要的能源,影响着我国工业和国民经济,其在支撑着社会各个领域快速发展的同时,产生的噪声问题也不容忽视。随着城镇化进程的加快,城内电力系统的更新,很多原来在城外的大型变电站,逐渐向城区、住宅区靠拢,一些大型变电站更是被安置在城区内。这一改变,将使电力系统中的变压器噪声与其他工业噪声一起,给人们的生产、生活带来很大的冲击。因此,电力系统中变压器噪声污染引起了人们的高度重视,噪声高速同步定位技术也开始成为人们研究的重点问题。

在变压器噪声定位技术的研究领域,国内外学者已经取得了一定的进展。李慧奇等^[2]在间谐波下对变压器铁心振动噪声特性进行了实验研究,揭示了间谐波对变压器噪声的影响,为变压器噪声控制提供了理论依据,但不足之处在于未充分考虑配电网中分布式发电单元对故障特性的影响。李冰等^[3]针对直流偏磁下 500 kV 单相变压器振动噪声进行了试验研究,分析了直流偏磁对变压器振动噪声的影响,并提出了相应的噪声控制措施,然而未涉及分布式发电单元对故障诊断过程的具体影响。范慧芳等^[4]通过结合新型电网故障方法,建立智能电网的故障的诊断模型,通过 MATLAB 仿真计算,验证了该模型在对智能电网故障诊断中取得良好的预测效果,但在复杂多变的实际环境中,其适应性和泛化能力有待提高。周晶等^[5]在研究如何实现变压器内局部放电信号的精确定位问题时,将 NS-APSO 自适应微粒群算法引入到局部超声定位法中,使微粒群通过优胜劣汰,以较好微粒取代较弱微粒,进而提升微粒群的总体品质,但在需要实现高精度定位的情况下,计算复杂度较高,不适用于资源受限的场合。

本文根据噪声辐射特点,以中小型变压器为研究对象,提出一种噪声高速同步技术,从而避免噪声对变压器的故障诊断产生影响。

1 中小型变压器噪声高速同步定位技术设计

使用 NI PCIe-4431 高速数据采集卡和高精度麦克风硬件设备,对阵列在变压器周围的噪声信号进行实时采集,利用 LabVIEW 软件进行信号的滤波和去噪,根据变压器噪声的格林函数和边界积分方程,计算变压器噪声辐射的声压。运用 ANSYS 软件进行有限元分析,模拟噪声在变压器内部的传播过程。使用 MATLAB 软件的自适应分解算法,将噪声信号分解为不同的频域分量,计算四阶谱累计量和谱度,提取噪声特征。开发基于改进粒子群优化算法的定位软件,根据提取的特征实现噪声源的精确定位。利用 SoundSight 3D 声学照相机进行实际噪声场

的可视化,完成中小型变压器噪声高速同步定位技术设计。

1.1 计算变压器噪声辐射声压

在对变压器噪声进行同步定位的过程中,结合仿真处理的结构振动,获取噪声的位移和速度,并在复杂的声辐射分析领域^[6],获取变压器噪声振动结构在介质中产生的声压辐射 K 满足微分方程,得到辐射条件为:

$$\nabla^2 K + f^2 K = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\beta K}{\beta m} = -i\theta\omega V_i \quad (2)$$

$$\lim_{y \rightarrow \infty} \left[y \left(\frac{\beta K}{\beta y} \right) - i f K \right] = 0 \quad (3)$$

式中: f 表示传播频率; V_i 为噪声在介质中的传播速度; m 为变压器噪声的单位矢量; θ 为传播方向; ω 为传播介质的密度; $y = A - B$, A 为变压器噪声在介质中的任意传播点, B 为噪声在空间中的任意传播点。

根据上述辐射条件,计算出变压器噪声的格林函数,表示为:

$$P(A, B) = \frac{e^{-r}}{2\pi r} \quad (4)$$

式中: r 表示噪声辐射半径。

考虑到环境的影响,利用加权残值法,结合式(4)的格林函数,利用声压 $K(B)$ 和噪声的传播速度 V_i , 建立变压器噪声边界的积分方程:

$$xK(B) = \int \left[K(B) \frac{\partial P(A, B)}{\partial n} + i\theta\omega V_i(A)P(A, B) \right] \quad (5)$$

式中: x 表示噪声传播系数,如果 B 在辐射范围内, $x = 1/4$; 如果 B 不在噪声辐射范围内,则 $x = 1$ 。

将噪声辐射的区域 W 划分为 N 个网格单元,以每个网格节点为出发点,对噪声 ($B \in K$) 进行离散处理^[7],得到无边界求解方程:

$$[X] \{K\} = [Y] \{V_i\} \quad (6)$$

式中: $[X]$ 和 $[Y]$ 分别表示噪声辐射特点矩阵; $\{K\}$ 表示噪声表面的声压向量; $\{V_i\}$ 表示噪声的辐射速度向量。

当 $\{V_i\}$ 为已知时,在噪声辐射的边界条件固定下,利用有限元分析法^[8],获取 $[X]$ 和 $[Y]$ 的传播速度和频率,根据变压器噪声节点声压向量 $\{K\}$ 获得。在已知 $\{K\}$ 和 $\{V_i\}$ 的情况下,得到变压器噪声辐射声压计算公式如下:

$$k_p = \{x\}^i \{K\} + \{y\}^i \{V_i\} \quad (7)$$

式中: $\{x\}^i$ 和 $\{y\}^i$ 分别表示辐射声压向量系数。

在辐射条件下,建立变压器噪声边界的积分方程,通过离散化求解,计算变压器噪声辐射声压。

1.2 分析变压器噪声的传播机理

在获取变压器噪声辐射声压后,通过振动产生的辐射声压会通过变压器内部的介质传播,如空气和变压器油

等,也会通过变压器内部结构元件传播,并通过变压器外壳,得到向外辐射的噪声。因此,为了准确定位变压器噪声位置,需先确定变压器噪声的传播机理,从而获取抑制变压器噪声的方法。

变压器的噪声主要通过变压器内的铁芯、风扇、油泵等的振动作用,通过变压器本身的冷却作用^[9],发生二次振动引起的。

电力变压器的噪声作为向外传播的噪声时,可以利用流体动力方程来表示变压器噪声辐射的波动方程式,用下式表示:

$$\frac{1}{d^2} \frac{\partial^2 G}{\partial t^2} - \nabla^2 K = 0 \quad (8)$$

$$d = \sqrt{\frac{p}{h^0}} \quad (9)$$

$$\mathbf{V} = \left[\frac{\partial}{\partial a} \quad \frac{\partial}{\partial b} \quad \frac{\partial}{\partial c} \right] \quad (10)$$

式中: d 为噪声节点升压值; h^0 为变压器与空气耦合剂之间的传播矩阵; p 表示噪声辐射的刚度矩阵; \mathbf{V} 表示噪声传播的空气质量矩阵。

利用离散化,在变压器噪声进入空气域时使用微积分分解^[10],可以得到空气与变压器噪声耦合的有限元方程式:

$$H(i) = \sum_{i=1}^N \mathbf{Y}_i(i) + \mathbf{f}_n(i) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{Y}_i(i)$ 表示变压器与空气耦合的有限元矩阵; $\mathbf{f}_n(i)$ 为噪声传播的外域刚度矩阵。

变压器噪声在传播的过程中,不仅受变压器内部零件的影响,还受变压器外面气体的影响^[11],因此通过变压器自身向其他区域辐射出去,变压器噪声传播的过程方程表示为:

$$P(j) = P_x j_x^2 + P_y j_y^2 + P_z j_z^2 \quad (12)$$

式中: j_x 、 j_y 和 j_z 分别表示变压器运行过程中的三相电流; P_x 、 P_y 、 P_z 为变压器噪声在空气中的传播压力。

当变压器的噪声不仅来自变压器本身,还会夹杂着空气中的噪声,这些噪声在传播的过程中是不断变化的,在研究变压器噪声的传播机理的过程中,一般也需要把背景噪声考虑进去,在进行建模过程中只需要变压器本体就可以,忽略掉噪声在传播过程中的损耗。

1.3 确定变压器噪声的位置

在分析变压器的传播机理后,对变压器噪声的位置进行确定。采用自适应分解法^[12],将变压器的噪声信号 $G(i)$ 进行分解,变成高频噪声信号分量 $f_n(i)$ 和低频噪声信号 $\mathbf{K}_i(i)$, 表示为:

$$G(i) = \sum_{i=1}^N \mathbf{K}_i(i) + \mathbf{f}_n(i) \quad (13)$$

在对变压器中的噪声信号模式分量进行变换时,将 $\mathbf{f}_n(i)$ 分解成 $\mathbf{T}_{k_i}(L)$, 即:

$$\mathbf{T}_{k_i}(L) = SD [b_i(i) g^{f_n(i)}] \quad (14)$$

式中: $b_i(i)$ 用来描述变压器中噪声信号的瞬时辐射幅度; $g^{f_n(i)}$ 用来表述瞬时辐射频率。

将 $\mathbf{T}_{k_i}(L)$ 进行有限元解析^[13],得到变压器中噪声信号的有限元函数,即:

$$M(e, j) = SD \sum_{i=1}^n x_i y_i(t) g^{f_n(i)} \quad (15)$$

式中: x_i 表示变压器中噪声信号的分量系数。解析后的变压器噪声信号的频率是不变的,将变压器中噪声信号的频谱作为一种特征参数^[14],对噪声信号 $y_i(t)$ 进行分解,得到其频域分量的表达式为:

$$\mathbf{S}^* = \int_{-\infty}^{+\infty} M(e, j) f(k) \quad (16)$$

式中: $f(k)$ 表示变压器中噪声信号频率的辐射程度。根据噪声信号的频域分量,利用下式描述变压器中噪声信号的四阶谱累计量:

$$\mathbf{B}_{2f}(i) = \mathbf{T}_{bf} - \mathbf{S}^* \quad (17)$$

式中: \mathbf{T}_{bf} 表示噪声信号的频谱矩阵。利用噪声信号的四阶谱累计量,给出噪声信号的谱度^[15],确定噪声的位置:

$$D_\kappa(j) = \frac{\mathbf{B}_{2f}(i)}{[1 + \delta(j)]^2} \quad (18)$$

式中: $\delta(j)$ 表示噪声比。当 $\delta(j)$ 的值较小时, $D_\kappa(j) \approx \delta(j)$; 当 $\delta(j)$ 的值比较大时, $D_\kappa(j) \approx 0$ 。

将变压器中的噪声信号代入到多尺度划分中,相应的谱度代表着噪声路频域在变压器中的局部范围,从而确定变压器噪声的位置。

2 实验分析

2.1 定位测试

为了验证本文技术在变压器噪声定位中的性能,在某一供电公司的 220 kV 变电站中,分别选取一个室内变压器和一个室外变压器作为实验对象,进行噪声定位实验。

1) 室内变压器噪声定位

室内变压器的出厂日期为 1996 年,属于三相变压器,其容量为 32 000 kVA,冷却方式为油浸风冷和油浸自冷,实物如图 1 所示。

考虑到室内环境相对比较安静,变压器噪声会比较明显,根据室内变压器的噪声辐射特点,对室内变压器噪声进行定位,结果如图 2 所示。

图 2 的定位结果是根据噪声辐射特点,利用照相机拍摄的变压器图像。由图 2 可知,在辐射作用下,变压器的噪声比较集中,变压器噪声的声场图由不同的颜色构成,其中蓝色密集区域即为噪声区域,由于变压器在室内环境中运行时,需要依靠风扇降温,因此可以认为室内变压器的噪声主要来自风扇噪声,室内变压器噪声的定位结果为变压器中间右侧风扇区域。

2) 室外变压器噪声定位

在室外变压器噪声定位实验中,选择室外变压器的出



图1 室内变压器实物

Fig.1 Physical picture of indoor transformer



图3 室外变压器实物

Fig.3 Physical picture of outdoor transformer



图2 室内变压器噪声定位结果

Fig.2 Indoor transformer noise localization results



图4 室外变压器噪声定位结果

Fig.4 Outdoor transformer noise localization results

厂年份同样为1996年,其容量为50 000 kVA,冷却方式以油浸自冷为主,室外变压器的实物如图3所示。

与室内变压器相比,室外变压器的运行环境比较嘈杂,变压器的噪声并不显著,而且容易受到其他声音影响,在噪声辐射下,利用本文技术对室外变压器的噪声进行定位,结果如图4所示。

由图4可知,在辐射作用下,变压器的噪声分布比较均匀且集中,变压器噪声的声场图同样是由不同的颜色构成,其中蓝色密集区域即为噪声区域,由于室外运行的变压器不仅包括自身噪声,还包括环境中的其他噪音,导致噪声分布区域较大,室外变压器噪声的定位结果为右侧箱体区域,说明室外环境中右侧产生噪声的设备较多。

2.2 对比分析

为了突出本文技术在变压器噪声高速同步定位中的优越性,引入基于朴素贝叶斯模型的定位技术(方法1)和基于NS-APSO算法(方法2)的定位技术作对比,方法1基于贝叶斯定理,假设各特征之间相互独立,通过概率统计进行分类。通过引入先验概率,对变压器不同部件的故障特征进行加权,以提高定位的准确性。方法2是一种基于群体智能的优化算法,通过模拟鸟类觅食行为进行优化搜索,引入自然选择机制,通过适应度评估选择最优粒子,提高搜索效率。方法1通过使用麦克风阵列收集变压器噪声信号,从信号中提取频域和时域特征,构建基于提取特征的贝叶斯分类模型,利用训练好的模型对测试数据进

行分类,在变压器运行过程中,实时采集噪声信号,通过模型进行故障定位。方法2通过随机生成初始粒子群,计算每个粒子的适应度值,评估各粒子的适应度,根据适应度和自然选择规则更新粒子位置,重复迭代,直到满足终止条件,输出噪声源的最优解。

在某一供电公司的220 kV变电站中,选择一台室内运行的变压器进行噪声定位,避免外界噪声影响定位结果,在不同的频率下,测试了变压器噪声的定位精度,结果如图5所示。

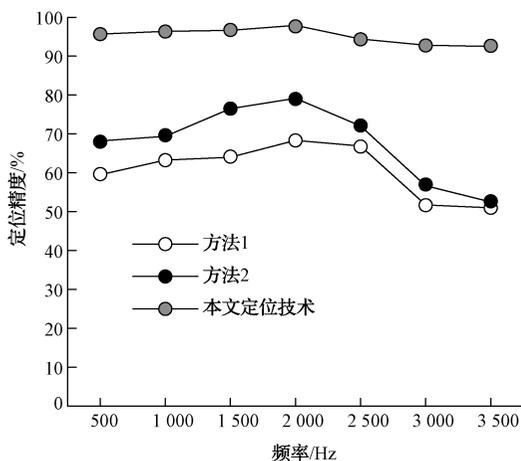


图5 变压器噪声定位精度测试结果

Fig. 5 Results of transformer noise localization accuracy test

从图5可以看出,由于500~1000低频段下的波长较长,更容易受到反射和衍射的影响,导致定位精度略有下降。在1000~2000中频段,噪声源的指向性增强,波形特征更加明显,有利于提高定位精度。3种方法在1000~2000频段的定位精度较高,2000~35000高频段波长较短,受多径效应的影响较小,但由于信号衰减快,对采集系统的灵敏度要求更高,所以该频段的定位精度呈下降趋势。采用方法1时,对变压器噪声的定位精度最低,在50%~70%,原因是朴素贝叶斯网络模型只能诊断出变压器中存在噪声,但是无法准确定位噪声的具体位置。采用方法2时,对变压器噪声的定位精度虽然有所提高,但是仍然低于80%,说明在粒子群算法中融入自然选择的思想之后,能够根据最佳粒子所在区域,确定变压器中噪声的区域,但是无法确定噪声的准确位置。采用本文技术时,根据噪声辐射的特点,确定噪声集中区域,辐射集中点即为噪声的位置,因此可以将定位精度提高到90%以上。

3 结论

本文根据噪声辐射特点,提出一种中小型变压器噪声高速同步定位技术,利用格林函数计算变压器噪声,并建立积分方程描述变压器噪声在空间中的传播特性。采用

流体力学方程模拟变压器噪声在空气中的传播情况,从而更准确地理解噪声的传播机理。通过有限元分析得到噪声信号的有限元函数,结合四阶谱累计量对噪声信号进行频域分析,得到噪声信号的频域分量,实现噪声的同步定位。

研究虽然取得一定成果,但是还存在很多不足,忽略了环境噪声对定位结果的影响,在今后的研究中,希望可以引入数字滤波算法,对环境中的噪音进行滤波处理并分离,从而提高变压器中噪声定位精度。

参考文献

- [1] 鲍长庚,朱征,宋平,等.基于解析解的变压器声电联合PD定位两步法[J].变压器,2020,57(7):31-34.
BAO CH G, ZHU ZH, SONG P, et al. Two step method for transformer acoustic electric joint PD positioning based on analytical solution [J]. Transformer, 2020, 57(7): 31-34.
- [2] 李慧奇,闫长祺,杨光,等.间谐波波下变压器铁心振动噪声特性的实验研究[J].太原理工大学学报,2020,51(6):874-880.
LI H Q, YAN CH Q, YANG G, et al. Experimental study on the vibration and noise characteristics of transformer iron core under inter harmonic [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51(6): 874-880.
- [3] 李冰,王泽忠,刘海波,等.直流偏磁下500 kV单相变压器振动噪声的试验研究[J].电工技术学报,2021,36(13):2801-2811.
LI B, WANG Z ZH, LIU H B, et al. Experimental study on vibration and noise of 500 kV single-phase transformer under DC bias [J]. Journal of Electrical Technology, 2021, 36(13): 2801-2811.
- [4] 范慧芳,咸日常,王涛,等.改进朴素贝叶斯模型在电力变压器故障定位中的应用[J].高压电器,2023,59(2):190-197.
FAN H F, XIAN R CH, WANG T, et al. Application of improved naive Bayes model in fault location of power transformers [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 190-197.
- [5] 周晶,罗日成,黄军,等.基于NS-APSO算法的变压器局部放电超声定位方法[J].电测与仪表,2022,59(8):155-160.
ZHOU J, LUO R CH, HUANG J, et al. Ultrasonic localization method for partial discharge of

- transformers based on NS-APSO algorithm [J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2022, 59(8): 155-160.
- [6] 刘元,苏盛,刘正道,等.基于时频域自相似性的配电变压器环境噪声识别方法[J].*电力自动化设备*, 2022,42(3):203-209.
LIU Y, SU SH, LIU ZH Y, et al. Environmental noise identification method for distribution transformers based on time-frequency domain self similarity [J]. *Power Automation Equipment*, 2022, 42(3): 203-209.
- [7] 贾骏,陶风波,杨强,等.复杂多径传播条件下变压器局部放电定位方法研究[J].*中国电机工程学报*, 2022,42(14):5338-5348.
JIA J, TAO F B, YANG Q, et al. Research on partial discharge localization method of transformers under complex multipath propagation conditions [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2022, 42(14): 5338-5348.
- [8] 宋云东,苑经纬,韩洪刚,等.基于FRA的变压器绕组径向变形定位和量化方法研究[J].*南京理工大学学报(自然科学版)*, 2022,46(4):476-483.
SONG Y D, YUAN J W, HAN H G, et al. Research on radial deformation localization and quantification method of transformer winding based on FRA [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 46(4): 476-483.
- [9] 席禹,林冬,于力,等.基于超高频传感器的电力变压器局部放电定位研究[J].*绝缘材料*, 2022,55(12): 80-86.
XI Y, LIN D, YU L, et al. Research on partial discharge localization of power transformers based on ultra high frequency sensors [J]. *Insulation material*, 2022,55(12): 80-86.
- [10] 周利军,王健,王路伽,等.强油导向结构变压器绕组区域温度建模及热点定位[J].*高电压技术*, 2020, 46(11): 3896-3904.
ZHOU L J, WANG J, WANG L J, et al. Temperature modeling and hotspot localization of transformer winding area with strong oil guiding structure [J]. *High Voltage Technology*, 2020, 46(11): 3896-3904.
- [11] 辛全金,李晓华,杨义,等.基于冗余卷积编解码器的变压器噪声抑制[J].*中国电力*, 2023, 56(4): 112-118.
XIN Q J, LI X H, YANG Y, et al. Transformer noise suppression based on redundant convolutional CODEC [J]. *China Electric Power*, 2023, 56(4): 112-118.
- [12] 周楠,王昕,杨海龙.基于超声合成孔径扫描联合算法的变压器绕组故障检测方法[J].*电力科学与技术学报*, 2022,37(5):198-206.
ZHOU N, WANG X, YANG H L. Transformer winding fault detection method based on ultrasonic synthetic aperture arc scanning joint algorithm [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(5): 198-206.
- [13] 张耘浩,张妹,张文海,等.基于台区变压器二次侧电压变化的配电网故障区段定位[J].*电力系统保护与控制*, 2022,50(16):23-32.
ZHANG Y H, ZHANG SH, ZHANG W H, et al. Fault section location of distribution network based on voltage changes on the secondary side of transformers in substations [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(16): 23-32.
- [14] 余昌佳,郑建勇,何嘉弘,等.时差筛选和ABC二次寻优的变压器局放超声定位方法[J].*高电压技术*, 2021, 47(8):2820-2827.
SHE CH J, ZHENG J Y, HE J H, et al. Ultrasonic localization method for transformer partial discharge using time difference screening and ABC secondary optimization [J]. *High Voltage Technology*, 2021, 47(8): 2820-2827.
- [15] 肖舒严,王强钢,周念成.基于稳健加权总体最小二乘的变压器局部放电定位[J].*电力自动化设备*, 2020, 40(8):203-215.
XIAO SH Y, WANG Q G, ZHOU N CH. Partial discharge localization of transformers based on robust weighted global least squares [J]. *Power Automation Equipment*, 2020, 40(8): 203-215.

作者简介

张佳成,本科,工程师,主要研究方向为噪声监测与控制技术、降噪材料研发、生态环境修复技术等。

郑中原(通信作者),硕士,高级工程师,主要研究方向

为噪声监测与控制技术、水污染控制技术、生态环境修复技术等。

E-mail:n26364604@163.com

于金山, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为噪声与电磁控制技术、储能技术、材料腐蚀防护技术等。

张淦恒, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电网规

划、电网施工建设、绿色建造、电网环境保护与水土保持。

闫立财, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为噪声特征分析技术、噪声提取及噪声定位算法、噪声及电磁监测技术。

张佃卯, 本科, 工程师, 主要研究方向为变电站噪声传播分析技术、噪声特征识别及噪声定位技术。