

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.044

基于分布式光纤传感的变压器绕组变形超声检测方法

陈子明¹, 曹晓晖¹, 陈启豪¹, 蔡涵颖², 马红星², 李平¹

(1. 中核核电运行管理有限公司, 浙江 海盐 314396;

2. 福建福清核电有限公司, 福建 福清 350318)

摘要:提出基于分布式光纤传感的变压器绕组变形超声检测方法,获取变压器绕组应变类型,助力故障准确诊断,增强变压器应用安全性。利用基于分布式光纤传感的布里渊光时域反射计实时测量变压器绕组变形超声信号;经小波变换技术和欧式距离处理方法完成超声应变信号降噪以及偏差处理后,采用S变换提取变压器绕组变形产生的各种超声应变信号的特征量,将其输入到改进后的极限学习机中,输出变压器绕组变形类别的超声检测结果。实验表明:该方法可有效检测变压器绕组变形类型,检测结果与实际情况一致;可有效消除超声应变信号采集偏差;对变压器绕组变形的超声检测准确率非常高,受复杂环境噪声干扰较小。

关键词:分布式光纤;变压器绕组变形;超声检测;BOTDR;小波变换;极限学习

中图分类号:TP39 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)01-0212-06

Ultrasonic Detection Method of Transformer Winding Deformation Based on Distributed Fiber Sensing

CHEN Ziming¹, CAO Xiaohui¹, CHEN Qihao¹, CAI Hanying², MA Hongxing², LI Ping¹

(1. CNNP Nuclear Power Operations Management Co., Ltd., Haiyan 314396, China;

2. Fujian Fuqing Nuclear Power Co., Ltd., Fuqing 350318, China)

Abstract: A distributed fiber optic sensing based ultrasonic detection method for transformer winding deformation is proposed, and transformer winding strain types are obtained, which assists in accurate fault diagnosis and enhances transformer application safety. Transformer winding deformation ultrasonic signals is measured in real time using a Brillouin optical time-domain reflectometer based on distributed fiber optic sensing. After denoising and deviation processing of ultrasonic strain signals using wavelet transform technology and Euclidean distance processing method, the S-transform is used to extract the feature quantities of various ultrasonic strain signals generated by transformer winding deformation and input them into an improved extreme learning machine to output the ultrasonic detection results of transformer winding deformation categories. The experiment shows that the proposed method can effectively detect the types of transformer winding deformation, and the detection results are consistent with the actual situation. The method can effectively eliminate the deviation of collecting ultrasonic strain signals, and the accuracy of ultrasonic testing for transformer winding deformation is very high and less affected by complex environmental noise interference.

Keywords: distributed optical fiber; transformer winding deformation; ultrasonic detection; BOTDR; wavelet transform; limit learning

0 引言

变压器在日常生活中被广泛应用,具有非常重要的作用,但在使用过程中因各种原因会导致变压器出现故障^[1],存在安全隐患。变压器绕组变形是变压器的故障之一,发生故障的频率也是最高的^[2-3]。为了减少变压器发生绕组变形的频率,很多国内外专家对变压器绕组变形提出了很

多检测方法。如冯翼等^[4]研究了一种基于脉冲编码激励超声扩频测距的变压器绕组变形检测技术,通过分析变压器表面介质的超声波波形转换以及传播途径。观察传播波形,利用不同波形的探头联合对变压器绕组内部进行检测,同时引用了超声波编码扩频测距方法。此方法可以将存在不一样信号的超声波一起发射,通过广义互相关分析检测到的变压器绕组变形情况,此方法检测

第一作者简介:陈子明(1974—),男,四川广源人,高级工程师,高级技师,研究方向为电气设备安装维修及管理, zaw0609@126.com。

精度较高,有利于高效地检测变压器绕组变形情况。李振华等^[5]设计了基于改进 $\Delta U-I$ 轨迹法的变压器绕组变形在线检测方法,首先阐明了检测变压器绕组变形的传统方法,运用负载标准化的方式解决了传统方法在应用中受到负载影响的不足之处,同时对传统方法进行修正提升变压器绕组变形的检测精度。但这两种方法对变压器绕组发生轻微变形的情况并不敏感,并且没有考虑到复杂环境下变压器附近会存在噪声的影响。

布里渊光时域反射计(BOTDR)可以对变压器绕组变形的微小应变超声信号实时监测^[6],同时,小波变换技术针对复杂的环境具有较好的降噪能力。因此,本文提出了基于分布式光纤传感的变压器绕组变形超声检测方法,进而达到减少变压器发生绕组变形检测故障的目的。

1 变压器绕组变形超声检测

1.1 基于 BOTDR 监测应变超声信号

分布式光纤的应变监测可以通过基于自发布里渊散射的布里渊光时域反射计(BOTDR)实现。依据其分布式测量、单端入射方式等特点,监测变压器绕组变形^[7]。BOTDR 的基本原理如图 1 所示。当单端输入脉冲光 w (频率)时就可以获取背向布里渊散射信号 $w-w1$ (频率),布里渊频移是 $w1$ 。从而根据一些参量完成对变压器应变信号的分布式传感。

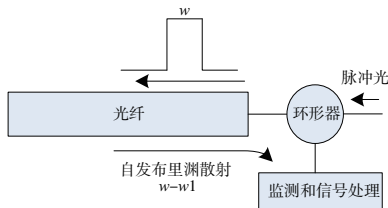


图 1 BOTDR 检测原理

具体实现 BOTDR 在变压器测试中的方式包括以下步骤。在变压器外部的适当位置布置光纤传感器。光纤传感器长度和布置方式根据实际需要确定。连接激光光源和检测器与光纤传感器,以便监测和接收布里渊散射信号。通过光源发出连续激光脉冲,经过光纤传输,布里渊散射将一部分激光散射回来。检测器接收返回的激光信号,并测量其幅度和相位。然后,采集和处理这些信号,计算布里渊频移。通过对布里渊频移的分析,推导光纤中的温度和应变分布情况。根据变压器

的实际情况,设置合理的阈值和报警级别。一旦监测到温度或应变超过设定的阈值,系统触发报警,提醒操作人员及时采取必要的措施。

光纤中光波和弹性超声波间耦合而发生的非线性光散射叫做布里渊散射效应^[8],布里渊频移是指布里渊散射对比于入射光频率的变化量。光纤材料的超声速度和强度影响着布里渊频移,其中超声速度和光纤材料的弹光效应和热光效应相关,光纤材料的密度和折射率影响这两种效应,可见布里渊位移的变化是由光纤的应变变化产生的,可用公式表达如下:

$$v_a(\varepsilon, T) = v_{a0}(\varepsilon_0, T_0) + C_{v\varepsilon}\Delta\varepsilon + C_{vT}\Delta T \quad (1)$$

式中: v_a 表示光纤在应变 ε 和温度 T 下的布里渊位移; v_{a0} 是光纤在初始应变 ε_0 和温度 T_0 下的布里渊频移; $C_{v\varepsilon}$ 和 C_{vT} 分别是布里渊频移的应变和温度系数。

变压器发生绕组变形的情况很大程度是因运输途中遭受碰撞或因短路发生的电动力冲击。将光纤与导线绕在一起再放入绕组导线中,如果导线产生形变,会导致光纤产生应变,通过布里渊散射能够监测到光线分布的应变量,便可监测变压器绕组变形的应变超声信号。

1.2 基于小波变换的绕组变形应变超声信号降噪

因变压器处在复杂的环境中,所以当变压器在工作时,超声信号的检测结果中会存在噪声,为了保证检测的准确性,对检测超声信号进行降噪^[9]。针对超声波信号的特点,本文采用小波变换对绕组变形的应变信号进行滤波降噪^[10]。

设定含噪变压器绕组变形应变超声信号模型为

$$f(n) = x(n) + \mu \cdot y(n), n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中: $f(n)$ 为含有噪声的信号; $x(n)$ 为真实的信号; μ 为噪声水平; $y(n)$ 为高斯白噪声; N 为信号长度。通过小波变换可得出

$$f = c + d \quad (3)$$

式中: c 为小波近似; d 为小波细节。则有:

$$c = w_c \times C \quad (4)$$

$$d = w_d \times D \quad (5)$$

式中: $w_c = f(n) \cdot C(n)$; $w_d = f(n) \cdot D(n)$; 小波分解系数 $w = [w_c + w_d]$; C 和 D 为基函数。基于小波变换下信号与噪声的不同特征,通过分解小波系数,区分信号和噪声,便于从 $f(n)$ 中获取 $x(n)$ 。小波系数的处理可以通过临界值的方式,将变压器绕组变形的应变信号进行重构,从而实现降噪^[11]。

1.3 基于欧氏距离的绕组变形应变超声信号偏差处理

由于 BOTDR 设备本身原因,易导致横、纵向测量偏差,所以利用欧氏距离解决此问题,以便准确地监测变压器绕组变形的应变超声信号。

将欧氏距离作为判定依据:

$$h = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{1k} - x_{2k})^2} \quad (6)$$

式中: h 表示欧氏距离; n 表示采样点数; x_{nk} 表示采样点的应变变量。移动应变曲线,移动次数以采样点的数量为准,移动间距以采样分辨率为准。将应变曲线移动后,得到应变曲线移动前后的欧氏距离,欧氏距离越大,表示越不准确。为此以最小的欧氏距离作为监测变压器绕组变形的超声信号。

1.4 基于 S 变换和 Log RELM 的绕组变形超声检测

通过 S 变换对降噪后的变压器绕组变形应变超声信号进行时频分析^[12],提取 S 变换后的时频特征量,将其作为 Log RELM(逻辑混沌映射的正则极限学习机)的输入,实现变压器绕组变形的超声检测。

1) 应变超声信号的 S 变换

S 变换为设定变压器绕组变形的连续应变超声信号 $x(t)$ 的小波变换,表达为

$$W_{T_x}(\tau, a) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{a,T}\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt}{\sqrt{a}} \quad (7)$$

式中: τ 表示时移因子; a 表示尺度因子;小波基函数为 $\psi_{a,T}\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$ 。基函数选择高斯窗函数 $\psi_{a,T}(t) = e^{-t^2/2} / \sqrt{2\pi}$, 所以小波变换可表示为

$$W_{T_x}(\tau, a) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2a^2}} dt}{\sqrt{a} \cdot \sqrt{2\pi}} \quad (8)$$

$x(t)$ 为任意信号, S 变换表达如下:

$$S(\tau, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi(\tau - t, f) e^{(-i2\pi ft)} dt \quad (9)$$

$$\psi(\tau - t, f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} |f| e^{[-(t-\tau)^2 f^2]} \quad (10)$$

式中 f 表示频率。由卷积理论和傅里叶变换,可获取 S 变换表达如下:

$$S_F(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\varphi + f) e^{-\frac{1}{f^2} 2\pi^2 \varphi^2 e^{i2\pi \varphi \tau}} d\varphi \quad (11)$$

同等时间距离采集的 $x(t)$ 可通过分解得到离散信号 $x(p)$ [$p=0, T, 2T, \dots, (Y-1)T$], 其中, 样本总量用 Y 表示, 采样周期用 T 表达, 从而获取

$x(p)$ 的 S 变换:

$$S[m, n] = \sum_{p=0}^{Y-1} x(p) \frac{1}{Y\sqrt{2\pi}} n e^{-\frac{n^2(m-p)^2}{2Y^2}} e^{-\frac{i2\pi pm}{Y}};$$

$$m = 0, 1, \dots, Y-1; n = 0, 1, \dots, Y-1 \quad (12)$$

由上述可知,通过 S 变换^[13],离散信号获取了 S 矩阵。矩阵的行向量和列向量分别代表频率向量和时间向量,行向量表示在频率不变的情况下,时间的变化影响信号幅值的变化;通过行向量可以监测出变压器绕组的一饼形变和多饼形变的超声信号。列向量表示在时间不变的情况下,频率影响着信号幅值的变化;通过列向量可以监测出变压器绕组内凹形变和鼓包形变的超声信号。

2) 基于 S 变换的特征量提取

考虑到变压器绕组发生形变的各种应变超声信号,需要对变压器绕组变形的特征量进行提取。包括 5 个特征量,分别是时间幅值包络线平均能量、平均值、标准差以及频谱标准差平方根均值和频率幅值包络线标准差。分别记作 T_1, T_2, T_3, F_1, F_2 , 其中时域特征量是 T_1, T_2, T_3 , 频域特征量是 F_1, F_2 。

这 5 个特征量是检测发生变压器绕组变形时所需要的特征,一般可以检测出变压器状态为正常状态、鼓包变形状态和内凹变形状态,最后通过程序自动提取特征量。

3) 基于 ELM 的变压器绕组变形超声检测

对于单隐含层前馈神经网络,提出了一种新算法——极限学习机(ELM)。通过极限学习机随机生成输入层和隐含层间的连接权值与隐含层神经元的临界值,仅需要算出激活函数和隐含层神经元的数量,进行一步学习就可以得到隐含层与输出层之间的连接权值。极限学习机的训练方法相比于其他训练方法,很大程度提升了网络学习的泛化能力,加快了学习时间。极限学习机的结构如图 2 所示。其中输入量是 $x_1, x_2, \dots, x_M$; 输出层与隐含层节点权值是 β ; 输入层与隐含层连接权值是 W ; 输出层是 $y_1, y_2, \dots, y_M$ 。

设有 M 个样本,则变压器绕组变形检测的训练集为 $\{x_i, y_i\}$ ($i=1, 2, \dots, M$), 输入量为 x_i , 表示 S 变换提取到的变压器绕组变形的特征量, 输出量为 y_i , 表示变压器绕组变形的类型, 则机器学习模型为

$$y_i = \sum_{k=1}^L \beta_k f(w_k \cdot x_i + b_k), \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (13)$$

式中: L 表示隐含层神经元数量; $w_k = [w_{k1}, \dots, w_{kn}]$

表示输入层和第 k 个隐含层神经元间的连接权值; b_k 为第 k 个隐含层神经元的偏置; $\beta_k = [\beta_1, \dots, \beta_m]$ 为第 k 个隐含层神经元和输出层之间的连接权值; $f(x)$ 表示激活函数, $f(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$ 。

将式(13)简化为

$$Q = H\beta \quad (14)$$

式中: H 为隐含层输出矩阵; β 为输出权值矩阵。

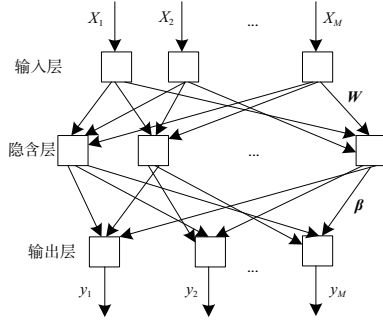


图2 极限学习机结构

极限学习机是通过偏置参数和输入连接权值参数获取最佳的输出连接权值 β 。求解是通过转化成最小二范数的求解:

$$\|H\beta - Q\| = \min_{\beta} \|H\beta - Q\| \quad (15)$$

从而得到输出连接权值矩阵 β :

$$\beta = H^+ Q \quad (16)$$

式中 H 的 Moore-Penrose 广义逆矩阵是 H^+ 。

4) ELM 算法优化

传统的 ELM 模型是依据最小二乘法对模型进行最佳求解,从而达到误差最小的目的。但是此方法会产生过拟合的情况,对变压器绕组变形的超声检测精度较低。同时,随机分配的输入层和隐含层间的连接权值与隐含层上的偏置会对变压器绕组变形的超声检测造成影响。针对此问题,本文利用提出的逻辑混沌映射的正则 ELM (LogRELM) 对变压器绕组变形的问题进行超声检测。通过正则化系数 λ 解决训练误差 e 和输出连接权值 β , 对式(15)进行改进:

$$\begin{cases} \min_{\beta} \lambda \|e\|_2^2 + \|\beta\|_2^2 \\ y - H\beta = e \end{cases} \quad (17)$$

输出连接矩阵可以根据拉格朗日算子对上式求解,得

$$\beta = \left(H^T H + \frac{I}{\lambda} \right)^{-1} H^T y \quad (18)$$

式中 I 为单位矩阵。

通过 LogRELM 算法对 ELM 算法进行还原得到初始化的输入权值矩阵为

$$u_k = \psi u_{k-1} - \psi u_{k-1}^2 \quad (19)$$

式中 ψ 为调节系数。

利用上式得出的输入权值矩阵为

$$W = \begin{bmatrix} u_1 & \cdots & u_{n \cdot (L-1)} \\ \vdots & & \vdots \\ u_n & \cdots & u_{N \cdot L} \end{bmatrix} \quad (20)$$

logRELM 算法与 ELM 算法不同, logRELM 算法不需要设置偏置, 所以 $b_k = 0$ 。

因混沌系数初始值 u_1 、调节系数 ψ 、隐含层神经元个数 L 、正则化系数 λ 影响 logRELM 算法对变压器绕组变形的超声检测, 所以, 针对 $\Omega = (u_1, \psi, L, \lambda)$ 通过粒子群算法 (POS) 进行优化, 得到的目标函数为

$$\min_{\Omega} \|H\beta - q\| \quad (21)$$

经粒子群算法优化后, 获取最佳 logRELM 参数, 利用具备最佳参数的 logRELM 实现变压器绕组变形超声精准检测, 获取变压器绕组变形类型。

2 实验分析

为了验证本文方法对变压器绕组变形超声检测的有效性, 选用与变压器绕组变形相似的材料, 3 mm (内径) × 5 mm (外径) 的 PVC 管作为实验对象。变压器的温度变化范围在 20 °C ~ 130 °C, 应变的变化范围在 200 $\mu\epsilon$ ~ 800 $\mu\epsilon$ 。变压器绕组的结构可能对光纤传感器的光束产生遮挡, 影响到 BOTDR 信号的采集和测量。在布置光纤传感器时, 需要考虑绕组的布置方式、间距和可能存在的障碍物, 以确保光纤传感器的正常工作。变压器工作时会产生电磁场和热量, 热量可能会对光纤传感器的精度和可靠性产生影响。因此, 在实际应用中需要综合考虑这些因素, 并采取适当的措施进行干扰和热管理。但是因实际的绕组比 PVC 管的受力较大, 所以将实验对象放置于绕组的外表面, 以便达到比较明显的应力分布。以内径为 440 mm、长度为 180 m、每饼为 6 匝共 18 饼形成一个变压器绕组模型。光纤参数如表 1 所示。

表1 光纤参数

参数	数值
包层半径/mm	62
护套半径/mm	450
涂覆层半径/mm	120
允许弯曲半径/mm	10
衰减/(dB/km)	0.23

针对在制成变压器绕组模型的过程中,光纤会受到拉拽或者挤压等影响,采用本文方法对变压器绕组变形的应变超声信号进行监测。测试仪器包括激光光源、光纤传感器、探测器和信号采集系统等。光源发出连续的激光脉冲,经过光纤传输到物理模型并散射。探测器接收到返回的激光信号,测量其幅度和相位。采集器将信号传输给信号处理系统,并进行数据处理和分析。通过对原始信号的处理和分析,计算出布里渊频移,并从中推导出变压器绕组的应变分布情况。原始信号特征包括幅度信息、相位信息、频谱特征和时域特征。

在绕组第5饼附近的线圈设置鼓包形变,变形6 mm,在第14饼附近设置线圈内凹形变,变形6 mm,具体如图3所示(本刊为黑白印刷,相关疑问咨询作者)。



图3 变压器绕组线圈形变示意图

因导线在绕制时光纤会受到拉扯发生应变,所以绕组的正反饼数量与应力曲线的波峰和波谷的数量应一致。采用本文方法监测变压器绕组变形前后的应变曲线,如图4所示。由图4可以看出,当导线产生鼓包时应变量正增长,导线产生内凹时,应变量负增长。因实际情况当导线发生鼓包时,变压器绕组光纤受到拉扯,应变量为负值;当导线发生内凹时,变压器绕组光纤受到挤压,应变量为正值。此应变曲线与实际情况一致。实验结果说明,本文方法可有效检测变压器绕组变形。

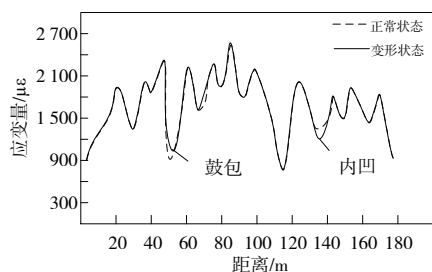


图4 变压器绕组变形前后的应变曲线

为验证本文方法的绕组变形应变超声信号偏差处理的效果,设置3 m为空间分辨率,脉宽为15 ns(此时光纤上某一点应变的数值反映的是该点移动3 m内光纤的综合应变),统计采集绕组变形应变超声信号曲线以及本文方法处理前后的绕组变形应变超声信号曲线,结果如图5所示。由图5可以看出,通过本文方法处理前监测到的变压器绕组变形的应变曲线与实际应变曲线的欧氏距离较大,说明监测不够准确,而通过本文方法处理后监测到变压器绕组变形的应变曲线与实际应变曲线欧氏距离接近,则说明本文方法监测变压器绕组变形的应变超声信号准确率较高。

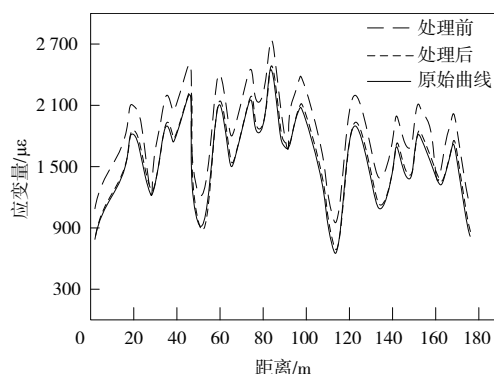


图5 处理结果对比

根据上文所提到的检测变压器绕组变形所需要提取特征量的计算方式,本文选取210组样本特征量作为变压器绕组变形的监测数据输入到ELM网络中,通过检测变压器绕组内凹、绕组鼓包、绕组松动和正常状态的准确率,证明本文方法的有效性,检测结果如表2所示。通过表2可以看出,变压器处于绕组松动、内凹、鼓包或者正常状态,采用本文方法对变压器绕组变形的检测准确率都高于95%。针对分布式光纤的特征,本文方法对变压器绕组变形的超声检测准确率非常高,而且不会受到形变数量的影响。

表2 变压器绕组变形的检测结果

绕组变形状态	总个数	正确识别个数	准确率/%
正常状态	30	29	96.67
松动	50	49	98.00
11 饼内凹	20	19	97.50
15 饼内凹	30	30	100.00
10 饼鼓包	40	28	95.00
7 饼鼓包	40	40	100.00

为了进一步验证本文方法对变压器绕组变形超声检测的有效性,选取文献[4]基于脉冲编码激励超声扩频测距的变压器绕组变形检测方法和文献[5]基于改进 $\Delta U-I$ 轨迹法的变压器绕组变形在线检测方法与本文方法作对比,统计不同信噪比下,变压器绕组变形超声检测对比结果如表3所示。通过表3可以看出,当信噪比不断提高时,文献[4]方法、文献[5]方法和本文方法对变压器绕组变形的超声检测精度都有所提高;同时,本文方法在不同信噪比的情况下,对变压器绕组变形的超声检测精度都高于文献[4]方法和文献[5]方法,在信噪比为 16.7 dB 时,本文方法对变压器绕组变形的超声检测精度已达到 100%,即使信噪比为 11.2 dB 时,本文方法的检测精度达到 93.53%。原因在于,利用 BOTDR 完成应变超声信号检测后,本文方法采用小波变换技术对检测到的信号进行了降噪处理,可显著降低噪声对变压器绕组变形检测的影响,提高检测精度。

表3 不同信噪比下变压器绕组变形的检测结果

信噪比/dB	检测精度/%		
	文献[4]方法	文献[5]方法	本文方法
11.2	86.24	87.38	93.53
13.5	86.92	88.21	95.42
14.8	89.25	88.65	97.19
15.2	91.27	90.62	99.16
16.7	92.64	92.75	100.00

3 结语

为了减少变压器发生绕组变形的频率,本文提出了基于分布式光纤传感的变压器绕组变形超声检测方法,并通过实验证明了本文所提方法的有效性。依据光纤应变曲线证明了 BOTDR 可以准确地监测到变压器发生绕组变形的超声应变信号;通过 S 变换提取所监测到的 210 组数据作为变压器绕组变形的特征量输入到 ELM 网络中,可准确检测到变压器发生绕组松动、绕组内凹、绕组鼓包等变形;同时考虑到变压器处于复杂环境中,针对监测到的应变超声信号,本文采用小波变换

的降噪方法,提高了变压器绕组变形的超声检测精度。

参考文献:

- [1] 杨名宇,范晓舟,刘云鹏,等. 基于数学形态学与分布式光纤传感的变压器绕组变形定位及检测[J]. 变压器,2020,57(7):61-65,85.
- [2] 周楠,王昕,杨海龙. 基于超声合成孔径弧形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.
- [3] 徐征宇,李鹏,张书琦,等. 基于分布式光纤传感的变压器绕组变形定位技术[J]. 电网技术,2022,46(8):3224-3230.
- [4] 冯翼,杜好阳,李一木,等. 基于脉冲编码激励超声扩频测距的变压器绕组变形检测技术[J]. 高电压技术,2020,46(11):3960-3969.
- [5] 李振华,蒋伟辉,郑严钢,等. 基于改进 $\Delta U-I$ 轨迹法的变压器绕组变形在线检测方法[J]. 高压电器,2021,57(8):142-150.
- [6] 王成亮,官国飞,徐妍,等. 基于布里渊散射光纤传感技术的温度和应变同时测量误差分析[J]. 光通信技术,2021,45(11):11-17.
- [7] 刘伟,韩彦华,王荆,等. 基于粒子群算法优化支持向量机的变压器绕组变形分类方法[J]. 高压电器,2020,56(3):72-78.
- [8] 李浩,王峰,周霄,等. 基于布里渊光时域反射计的紧套型 OPGW 覆冰厚度监测[J]. 光子学报,2021,50(11):1106001.
- [9] 石翠萍,韩崇彬,邓强强,等. 基于图形小波变换的遥感图像表示与去噪[J]. 电讯技术,2020,60(1):76-80.
- [10] 王雨虹,石玉文,付华,等. 基于小波变换和压缩感知对煤岩体声发射信号降噪方法[J]. 信息与控制,2020,49(1):87-94.
- [11] 刘红文,王科,周祥宇,等. 基于时频变换的变压器绕组振荡波信号分析方法[J]. 高压电器,2020,56(12):264-271.
- [12] 马文嘉,王丰华,党晓婧. 基于稀疏自适应 S 变换的变压器短路冲击绕组状态声信号检测[J]. 电网技术,2021,45(9):3755-3762.
- [13] 刘云鹏,步雅楠,贺鹏,等. 基于 S 变换和 ELM 的变压器绕组应变检测识别[J]. 高压电器,2020,56(1):9-17.

收稿日期:2023-08-01