

基于带状光纤分布式传感的变压器绕组 轴向与辐向形变区分及程度检测

李东阳¹, 刘云鹏^{1*}, 范晓舟¹, 李欢², 黎晏霖¹, 刘海琳¹

- (1. 河北省输变电设备安全防御重点实验室(华北电力大学), 河北省 保定市 071003;
2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京市 西城区 100045)

Discrimination and Degree Detection of Axial and Radial Deformation in Transformer Windings Based on Distributed Sensing of Ribbon Optical Fibers

LI Dongyang¹, LIU Yunpeng^{1*}, FAN Xiaozhou¹, LI Huan², LI Yanlin¹, LIU Hailin¹

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense

(North China Electric Power University), Baoding 071003, Hebei Province, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Supply Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100045, China)

ABSTRACT: In order to have a clearer sense of the transformer winding deformation, it is necessary to detect the axial and radial deformation of windings simultaneously. The paper firstly analyzes the strain distribution regularities of ribbon optical fibers on the windings, according to which the concept of strain vector as well as the decoupling method of axial and radial strain of the windings is proposed. Subsequently, with ribbon optical fibers laid on a 35 kV continuous winding prototype, a test platform is set up. With the help of Brillouin optical time domain analysis technology, the distributed strain sensor is used to measure the axial and radial deformation of the windings, and the relative error of strain vector is within 7.5%. Finally, it is obtained that the axial and radial deflection of the windings and the average strain of the ribbon optical fibers satisfies a quadratic function relationship, i.e. $R^2 > 0.99$. The degree of deformation of the windings is predicted using this relationship, with an error of less than 5%. The proposed method could not only detect axial or radial deformation individually, but also derive axial and radial deformations separately when both deformations occur at the same time, which addresses the problem that the axial deformation of windings cannot be sensed effectively and the degree of deformation is difficult to be determined quantitatively, as well as provides a new solution for detecting transformer winding deformation.

KEY WORDS: transformer; winding deformation; axial and radial strain decoupling; distributed optic fiber sensing; Brillouin optical time domain analysis technology

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5206002000D6)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5206002000D6).

摘要: 为对变压器绕组形变状态有更清晰的感知, 需要对绕组轴向及辐向形变进行同时检测。该文首先分析绕组弯曲时的应变分布规律, 并提出应变向量的概念及绕组轴向与辐向应变解耦方法。随后, 在 35 kV 连续式绕组模型上布置带状光纤并搭建试验平台, 借助布里渊光时域分析技术以进行应变分布式传感, 完成对绕组形变的轴向、辐向区分测量, 应变向量相对误差在 7.5% 以内。最后, 得出绕组轴向、辐向挠度都与带状光纤平均应变满足二次函数关系, 拟合系数 $R^2 > 0.99$, 并利用该关系预测绕组的变形程度, 误差小于 5%。该文方法不仅能单独检测轴向或辐向形变, 也能在同时发生两种形变时分别得出轴向和辐向形变; 可以解决绕组轴向形变无法有效传感及变形程度难以定量判断的难题, 为变压器绕组形变的检测提供新的方案。

关键词: 变压器; 绕组形变; 轴向与辐向应变解耦; 分布式光纤传感; 布里渊光时域分析技术

0 引言

电力安全事关国计民生^[1], 电力变压器是电网中最重要的设备之一, 其稳定运行直接影响电网安全。变压器工作时可能会经受不同程度的短路电流, 巨大的轴向和辐向电动力可能导致绕组发生扭曲、鼓包和塌陷等变形^[2-7], 准确检测变压器绕组形变具有重要意义^[8-9]。

绕组变形的传统检测手段可分为电气法和非电气法。电气法主要有短路阻抗法、频率响应法和低压脉冲法等; 非电气法主要有振动法、超声波检测法^[10-12]等。以上传统方法易受电磁或其他环境干扰, 且大多通过某特征量来间接反映变压器绕组的形变

状态,灵敏度和重复性仍有提升空间,主要用于离线检测,难以满足在线监测的要求^[13-16]。

分布式光纤传感(distributed optical fiber sensing, DOFS)技术能够实现大规模、长距离、高性能的测量,可同时获得沿光纤路径上时间和空间的连续分布信息,具有抗电磁干扰^[17-18]、绝缘性好、灵敏度高等优势^[19],在电力设备的在线监测中应用前景良好^[20]。

针对 DOFS 在绕组形变检测上的应用,国内外专家学者已开展一些研究。文献[21]探究 DOFS 技术在变压器绕组变形监测中的可行性,并研制光纤复合式绕组模型;文献[22]研究基于 DOFS 的应变检测方法,并提出了基于 S 变换和极限学习机(extreme learning machine, ELM)的绕组辐向应变识别技术;文献[23]提出一种检测绕组形变的光学频率响应分析(optical frequency-response analysis, OFRA)方法,能够定位变压器线饼的辐向变形位置,且得到辐向变形程度与变形矩阵的关系;文献[24-25]提出传感光纤与电磁线一体化结构及实现工艺,据此研制 1 台 10 kV 油浸式变压器模型,基于布里渊光时域反射(brillouin optical time domain reflectometry, BOTDR)技术获得短路时绕组的形变规律,并通过解体验证变压器绕组发生方向一致的螺旋变形;文献[26]在开槽导线中铺设护套紧包纤作为传感介质,通过试验对变压器绕组模型辐向变形程度与 BOTDR 所测得辐向应变之间关系进行研究。上述研究都将光纤布置于绕组导线的中间位置,且只有一根光纤用于应变的有效传感,对绕组的辐向形变可以有效感知;但当绕组仅发生轴向变形时,其应变测量值理论上均为 0。并且,其仅使用单根光纤传感,只能对绕组形变进行单一维度的测量,难以获得绕组形变的清晰状态。

然而,轴向与辐向变形均会对变压器绕组产生不同类型的危害,威胁电力系统的安全稳定。轴向变形会导致绕组之间或绕组与铁心的短路;线匝和线饼的纵向弯曲会阻塞饼间油道,影响散热性能,进而导致绝缘老化或绝缘失效;当轴向力过大或压紧力不足时,会造成绕组脱离心柱。辐向变形导致绕组的形状和结构变化,进而导致回路的电感值发生变化,影响正常的电压转换和能量传输;当变形使线饼导线的绝缘出现破裂时,会导致短路。轴向电磁力同时加上辐向力的影响,可能导致绕组扭曲^[27]。综上,轴向和辐向变形的区分测量能对绕组

变形的情况有更明确的认识,更利于对变压器绕组变形的发展趋势做出评估。

鉴于此,本文提出利用带状光纤进行分布式应变传感的新思路,并提出应变向量的概念及绕组轴向与辐向应变的解耦方法,实现绕组轴向与辐向变形程度的同时检测。和已有的研究工作相比,本文的创新和贡献如下:

1) 分析绕组线饼弯曲时带状光纤的应变分布规律,根据该分布规律,提出应变向量的概念及绕组轴向与辐向应变解耦方法,其中包括对带状光纤布置存在偏移时的处理方法;

2) 搭建基于带状光纤的分布式应变检测平台,对 1 台 35 kV 连续式绕组模型同时施加轴向和辐向变形,并对测量到的总应变解耦,分析轴向与辐向应变的解耦效果;

3) 根据解耦得到的绕组轴向与辐向应变,对绕组变形的挠度与应变之间的关系进行研究,并预测绕组挠度,完成变压器绕组轴向与辐向形变区分及程度检测。

1 分布式光纤应变传感原理

本文使用的应变传感元件为分布式传感光纤,可感知沿光纤轴线的拉伸与压缩形变。本节介绍分布式光纤应变传感的基本原理。

1.1 光时域反射技术

DOFS 技术依靠光时域反射(optical time domain reflectometry, OTDR)技术实现对散射事件的空间定位^[18],其原理如图 1 所示。激光器向光纤发射一束窄脉冲光,光子将与光纤内部的介质发生相互作用,产生后向散射,通过测量发送和后向散射光的时间差 t ,按照式(1)即可得到散射事件发生处距离光纤起始点的距离 l :

$$l = ct / (2n) \quad (1)$$

式中: n 为纤芯有效折射率; c 为真空中光速。

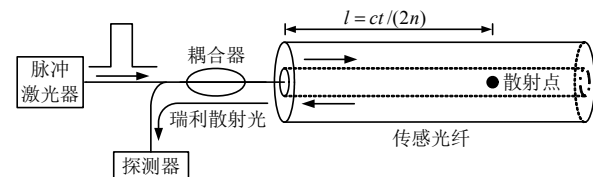


图 1 OTDR 原理图

Fig. 1 OTDR schematic diagram

1.2 布里渊光时域分析技术

布里渊光时域分析(Brillouin optical time domain analysis, BOTDA)技术是基于受激布里渊散

射(stimulated Brillouin scattering, SBS)效应的一种分布式光纤传感技术^[28]。

如图 2 所示, BOTDA 的基本原理是: 在光纤的两端分别注入泵浦光和探测光, 当泵浦光和探测光的频率差与光纤中的某个区间的布里渊频移相近时, 该区域就会发生 SBS 效应, 泵浦光将其部分能量通过声波场转移到探测光; 通过测量探测光功率的变化, 并利用 OTDR 技术实现定位, 便能够获得光纤沿线的能量传递情况; 不断控制二者的频率差变化并记录沿光纤的能量传递大小, 就能获得光纤沿线的布里渊增益谱(Brillouin gain spectrum, BGS), 对其拟合可得布里渊频移 (Brillouin frequency shift, BFS)分布^[29]。

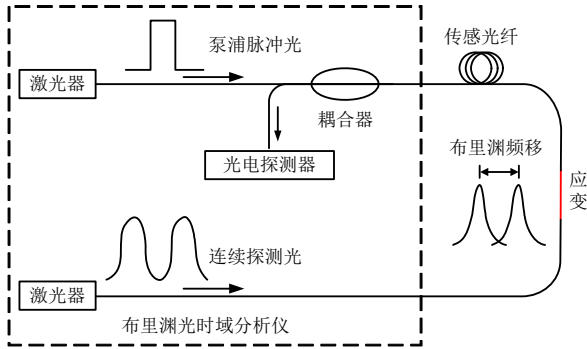


图 2 BOTDA 原理图

Fig. 2 BOTDA schematic diagram

BFS 的变化与光纤所受的轴向应变变化呈较好的线性关系, 如下:

$$\Delta v_B = \frac{\partial v_B}{\partial \epsilon} \cdot \Delta \epsilon = C_\epsilon \cdot \Delta \epsilon \quad (2)$$

式中: C_ϵ 为光纤的应变系数; $\Delta \epsilon$ 为相对于原始条件下光纤的应变变化量。通过检测光纤沿线的布里渊频移的变化即可实现应变传感。

2 绕组轴向与辐向应变解耦方法

为实现变压器绕组的轴向与辐向应变区分和解耦, 需利用不同位置光纤对应变感知的差异。同时考虑到绕组的结构, 本文采用多根光纤并排布置的带状光纤(简称“带纤”)作为传感元件, 并将其布置于线饼最外侧, 如图 3 所示。需要说明的是, 本文主要研究绕组轴向与辐向应变解耦及形变区分测量方法, 所以直接采用一根光纤绕 5 圈的方式构成带纤。为说明解耦原理, 首先分析物体弯曲变形的基本规律。

在此说明, 文中的轴向(辐向)应变为绕组线饼发生轴向(辐向)变形时光纤所测得的应变, 并非绕

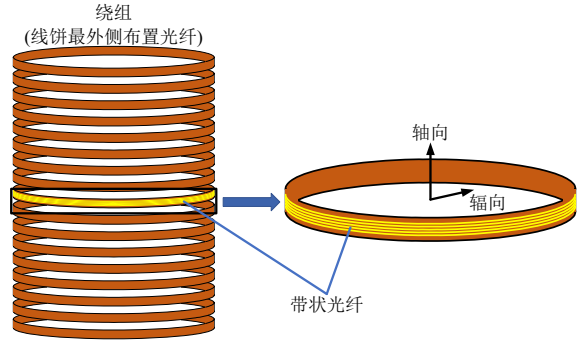


图 3 布置带状光纤的绕组示意图

Fig. 3 Schematic diagram of windings with ribbon optical fibers

组本身轴向(辐向)方向上的应变。

2.1 物体弯曲时的一般规律

某物体弯曲变形前、后的梁段分别如图 4(a)和 (b)所示, 图中点划线为中性层, 其长度在弯曲过程中不变。如图 4(c)所示, 以梁横截面的对称轴为 y 轴, 中性轴为 z 轴; 以过原点的横截面的法线为 x 轴。如图 4(a)和(b)所示, 变形前相距为 dx 的两个横截面, 变形后绕中性轴相对旋转, 角度为 $d\theta$, 距中性层为 y 的纤维 bb 的长度变为

$$\overline{b'b'} = (\rho + y)d\theta \quad (3)$$

式中 ρ 为中性层的曲率半径。纤维 bb 的原长度为 dx 。变形前、后中性层内纤维 OO 的长度不变, 故有:

$$\overline{bb} = dx = \overline{OO} = \overline{O'O'} = \rho d\theta \quad (4)$$

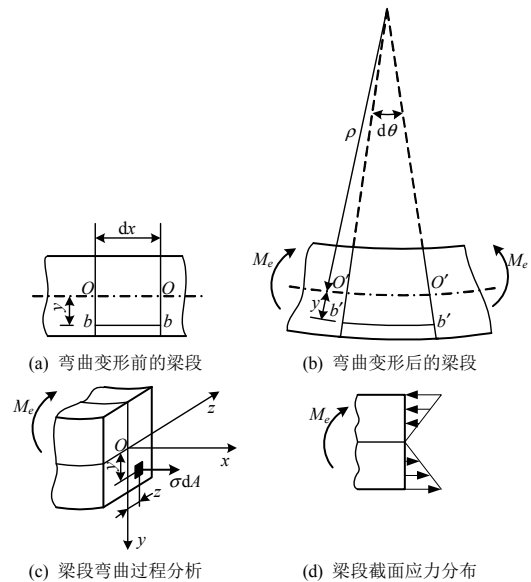


图 4 物体弯曲变形示意图

Fig. 4 Schematic diagram of object bending deformation

纤维 bb 的应变为

$$\epsilon = \frac{(\rho + y)d\theta - \rho d\theta}{\rho d\theta} = \frac{y}{\rho} \quad (5)$$

可见,纵向纤维的应变与它到中性层的距离成正比。

由此可得:在横截面上,任意点的正应力与该点到中性轴的距离成正比;正应力沿截面高度的分布规律如图4(d)所示,其中性层处等于0,在中性层两侧呈线性分布,且方向相反^[30]。

图3中的带状光纤的每根纤芯等间距,根据式(5),当绕组发生辐向变形时,因为各纤芯与中性层的距离相等,所以各纤芯的应变值相等。当绕组发生轴向变形时,因为各纤芯与中性层的距离不等且纤芯等间距,所以各纤芯的应变呈等差数列排列:若带纤位于线饼正中间,各纤芯正好关于中性层对称分布,则各纤芯的应变之和为零,中间纤芯的应变也为0,这也是传统光纤传感技术无法测量轴向变形的根本原因;若带纤存在偏移,则各纤芯应变之和为与带纤偏移量有关的非零值。以上规律在后文的绕组变形试验将会得到验证。

2.2 绕组轴向与辐向应变解耦方法

基于前文物体弯曲时的基本规律及布置于绕组的带状光纤所测得应变的分布规律,阐述绕组轴向与辐向应变解耦的基本思想。

为便于分析处理带纤所测应变数据,设 N 根光纤的应变分别为 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N$,定义带状光纤的应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N)^T \quad (6)$$

为通过光纤的应变区分绕组的轴向与辐向形变,将光纤的应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 分解为两个分量:一是由辐向形变造成的辐向应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_r$;二是由轴向形变造成的轴向应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_a$,分别如下:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r = (\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \dots, \varepsilon_{rN})^T \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_a = (\varepsilon_{a1}, \varepsilon_{a2}, \dots, \varepsilon_{aN})^T \quad (8)$$

总应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为辐向分量 $\boldsymbol{\varepsilon}_r$ 与轴向分量 $\boldsymbol{\varepsilon}_a$ 之和,即:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_r + \boldsymbol{\varepsilon}_a \quad (9)$$

当绕组发生辐向形变时, N 根光纤的应变相等,即 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_N$ 。当绕组发生轴向形变时, N 根光纤的应变值不等,呈等差数列递减或递增(与轴向形变的方向有关),若带纤无偏移,则其和为0,即 $\varepsilon_{a1} + \varepsilon_{a2} + \dots + \varepsilon_{aN} = 0$;若带纤有偏移,则 $\varepsilon_{a1} + \varepsilon_{a2} + \dots + \varepsilon_{aN} = N \cdot \Delta\varepsilon$,其中 $\Delta\varepsilon$ 为应变偏移量。

当绕组发生形变时,试验测得的光纤应变实际为带纤各纤芯构成的总应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$,即包含绕组的

轴向与辐向应变。根据该总应变向量与前述的轴向、辐向应变的特点,即可实现绕组轴向与辐向应变的解耦。现提出绕组轴向与辐向应变解耦的方法如下,流程图如图5所示。

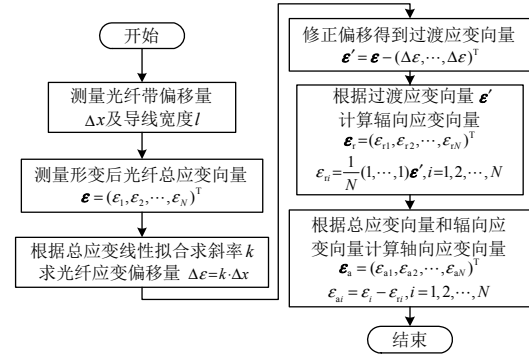


图5 辐向、轴向应变解耦流程图

Fig. 5 Flow chart of radial and axial strain decoupling

1) 根据变压器绕组的导线尺寸,确定变压器绕组最外侧应布置的带状光纤的芯数 N ;

2) 测量光纤带相对于导线中心的偏移量 Δx 及导线宽度 l ;

3) 当绕组形变后,使用分布式光纤应变传感系统测量 N 个纤芯的应变值 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N$,构成应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N)^T \quad (10)$$

4) 对应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的各分量与光纤坐标进行线性拟合,求得斜率 k ,该斜率表征单位距离下光纤的应变增量,然后确定带状光纤的应变偏移量 $\Delta\varepsilon$;将所有纤芯的应变值减去应变偏移量,修正偏移后得到并构成过渡应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}'$:

$$\Delta\varepsilon = k \cdot \Delta x \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}' = \boldsymbol{\varepsilon} - (\Delta\varepsilon, \dots, \Delta\varepsilon)^T \quad (12)$$

5) N 根纤芯的辐向应变构成辐向应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_r$,根据过渡应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}'$ 计算绕组的辐向应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_r$:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r = (\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \dots, \varepsilon_{rN})^T \quad (13)$$

$$\varepsilon_{ri} = \frac{1}{N} (1, \dots, 1) \boldsymbol{\varepsilon}', i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

6) N 根纤芯的轴向应变构成轴向应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_a$,根据总应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和辐向应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_r$ 计算轴向应变向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_a$:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_a = (\varepsilon_{a1}, \varepsilon_{a2}, \dots, \varepsilon_{aN})^T \quad (15)$$

$$\varepsilon_{ai} = \varepsilon_i - \varepsilon_{ri}, i = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

3 绕组变形试验

为验证绕组轴向与辐向应变解耦方法的可行

性及有效性，并实现绕组轴向与辐向形变程度的定量判断，现进行绕组变形试验。一般工程实际中应变都非常小，故引入微应变($\mu\epsilon$)来表征微小形变， $1 \mu\epsilon$ 表示形变量为原始尺寸的 10^{-6} 。

3.1 试验概述

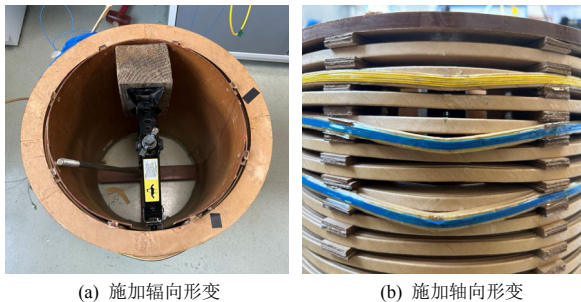
某 35 kV 变压器绕组模型共 40 饼，外径为 480 mm，导线宽度为 8 mm。在其线饼最外侧并排布置 5 根光纤，每根光纤之间预留适当的间隔，以便观察区分 5 根光纤的应变。布置过程中保持光纤紧贴绕组线饼，并使用环氧树脂胶粘合，以保证绕组与光纤之间的有效应变传递。试验现场图如图 6 所示。



图 6 绕组试验现场图

Fig. 6 Field diagram of winding test

试验方案：对绕组线饼施加辐向形变，使其形变量逐渐增大；随后，对已有辐向形变的绕组线饼继续施加轴向形变，并不断增大形变量。在此过程中，均保证绕组发生塑性形变，且每次施加形变后均使用 BOTDA 测量带状光纤的应变分布。对绕组施加辐向与轴向形变的过程如图 7 所示。



(a) 施加辐向形变 (b) 施加轴向形变

图 7 对绕组施加轴向与辐向形变

Fig. 7 Applying axial and radial deformation to the winding

3.2 试验结果

3.2.1 轴向与辐向应变的解耦

当对绕组线饼同时施加辐向和轴向形变后，使

用 BOTDA 测得的光纤应变中既包含辐向应变，也包含轴向应变，如图 8 所示的总应变测量曲线，文中“R12.5A5”表示绕组的状态为辐向挠度 12.5 mm、轴向挠度 5 mm，其他情况依此类推。以每根光纤的应变峰值作为该光纤的应变，得到各变形情况下的测量数据如表 1 所示。

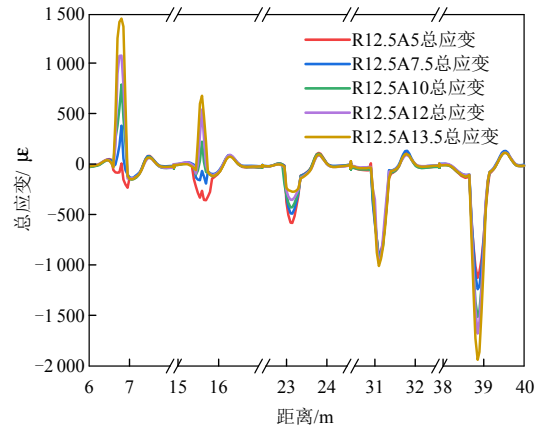


图 8 总应变测量曲线

Fig. 8 Total strain measurement curve

表 1 总应变测量值

Table 1 Total strain measurement value

挠度/mm	总应变向量/ $\mu\epsilon$				
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5
R12.5A5	17.58	-256.34	-575.23	-907.12	-1122.01
R12.5A7.5	394.96	-56.63	-483.15	-920.24	-1234.83
R12.5A10	803.90	234.26	-418.33	-958.76	-1510.93
R12.5A12	1093.41	354.91	-345.78	-979.02	-1677.52
R12.5A13.5	1461.34	691.70	-264.83	-1004.70	-1937.54

在此需要说明，因对绕组施加的是无法恢复的塑性形变，且试验过程中先施加辐向形变，当辐向形变施加结束后再对其施加轴向形变，所以辐向挠度一直为 12.5 mm，即 R12.5 时的数值。

图 8 和表 1 中的信息是轴向、辐向形变的叠加状态，为从轴向、辐向两个维度认识绕组的状态，区分绕组的轴向与辐向形变，现按前文所述方法对测量得到的总应变进行解耦，以得到辐向和轴向应变。

1) 求光纤应变偏移量 $\Delta\epsilon$ 。

应变偏移量是当带状光纤偏移绕组线饼中心位置时所产生，并且只有当发生轴向变形时才会存在。使用游标卡尺测得光纤位置偏移量为 $\Delta x = -0.82 \text{ mm}$ 。绕组导线宽度为 $l = 8 \text{ mm}$ ，光纤带宽度为 5.3 mm ，每根光纤的直径为 0.9 mm ，故计算得光纤间距为 0.2 mm 。建立如图 9 所示的坐标轴，根据几何关系可知：若光纤没有偏移，则 5 根光纤由左至

右的坐标分别为-2.2、-1.1、0、1.1、2.2 mm。

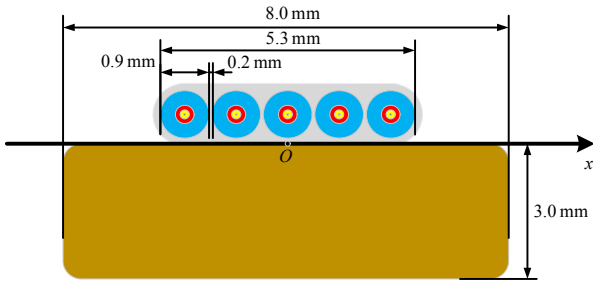


图9 带纤布置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of ribbon optical fibers arrangement

对表1中的每行数据分别进行线性拟合,求得斜率 k , 再乘以光纤位置偏移量 Δx 得轴向应变偏移量 $\Delta \epsilon$ 。汇总如表2所示。

表2 应变偏移量的计算

Table 2 Calculation of strain offset

轴向挠度/mm	斜率/($\mu\epsilon$ /mm)	应变偏移量/ $\mu\epsilon$	拟合优度
A5	-266.36	218.42	0.996
A7.5	-374.83	307.36	0.996
A10	-529.33	434.05	0.999
A12	-625.06	512.55	0.999
A13.5	-772.18	633.19	0.999

由表2可知,应变偏移量随着轴向挠度的增大而不断增大,因为轴向形变会使5根光纤应变发生不同程度的改变。

2) 修正偏移得到过渡应变向量 ϵ' 。

将每个轴向形变下的光纤应变减去求得的应变偏移量,即可得到不同轴向形变下的过渡应变向量,如表3所示。

表3 过渡应变向量

Table 3 Transition strain vector

挠度/mm	过渡应变向量/ $\mu\epsilon$				
	ϵ'_1	ϵ'_2	ϵ'_3	ϵ'_4	ϵ'_5
R12.5A5	-200.84	-474.76	-793.65	-1 125.54	-1 340.42
R12.5A7.5	87.60	-363.99	-790.51	-1 227.60	-1 542.16
R12.5A10	369.85	-199.79	-852.35	-1 392.81	-1 944.95
R12.5A12	580.85	-157.64	-858.33	-1 491.55	-2 190.05
R12.5A13.5	828.11	58.51	-898.02	-1 637.89	-2 570.69

3) 计算辐向应变向量 ϵ_r 。

对每个形变下的过渡应变向量的各分量求算术平均值,即得该状态下的辐向应变 ϵ_r ,如表4所示,辐向应变向量的各分量理论上相等。

以表4中5种情况下的辐向应变平均值作为最终计算值,故R12.5时的辐向应变向量计算值 $\epsilon_r = (-805.14, -805.14, -805.14, -805.14, -805.14) \mu\epsilon$ 。

表4 在各轴向挠度下得到的辐向应变

Table 4 Radial strain obtained under various axial deflections

轴向挠度/mm	辐向应变计算值/ $\mu\epsilon$	辐向应变均值/ $\mu\epsilon$
R12.5A5	-787.043	
R12.5A7.5	-767.332	
R12.5A10	-804.01	-805.14
R12.5A12	-823.344	
R12.5A13.5	-843.996	

在不同轴向挠度下,辐向应变计算值之间存在差异,其可能是测量随机误差与操作误差(施加轴向形变时难以严格保证辐向形变恒定)导致的。

4) 计算轴向应变向量 ϵ_a 。

利用各轴向挠度下的总应变向量 ϵ 减去对应的辐向应变向量 ϵ_r 即可得各轴向挠度下的轴向应变向量计算值,如表5所示。

表5 轴向应变向量计算值

Table 5 Calculated value of axial strain vector

挠度/mm	轴向应变向量计算值/ $\mu\epsilon$					应变大小 均值/ $\mu\epsilon$
	ϵ_{a1}	ϵ_{a2}	ϵ_{a3}	ϵ_{a4}	ϵ_{a5}	
A5	822.72	548.80	229.91	-101.98	-316.86	404.05
A7.5	1 200.10	748.51	321.99	-115.10	-429.66	563.07
A10	1 609.04	1 039.40	386.84	-153.62	-705.76	778.93
A12	1 898.54	1 160.05	459.36	-173.86	-872.36	912.83
A13.5	2 266.44	1 496.84	540.31	-199.56	-1 132.36	1 127.10

3.2.2 解耦结果分析

1) 辐向应变。

绕组线饼在不同辐向挠度下的应变实测曲线如图10所示。由图可知,当绕组发生辐向变形时,各纤芯的应变值在误差范围内相等,与2.1节的理论分析结果相同。

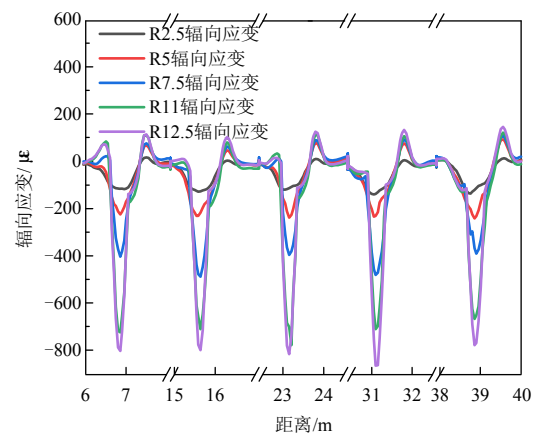


图10 辐向应变测量曲线

Fig. 10 Radial strain measurement curve

以应变曲线的峰值为该情况下的应变值,得不同辐向挠度下的应变实测值如表6所示。

表 6 辐向应变测量值

Table 6 Radial strain measurement value

挠度/ mm	辐向应变向量测量值/ $\mu\epsilon$					平均 应变/ $\mu\epsilon$
	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}	ϵ_{r3}	ϵ_{r4}	ϵ_{r5}	
R2.5	-114.3	-124.5	-111.6	-135.4	-119.1	-120.98
R5	-222.6	-215.0	-237.6	-232.6	-240.8	-229.72
R7.5	-403.8	-487.4	-395.0	-479.6	-389.7	-431.10
R11	-724.4	-711.8	-702.7	-711.8	-667.2	-703.58
R12.5	-804.4	-800.6	-817.1	-866.2	-778.6	-813.38

由 3.2.1 节可知，仅有 R12.5 情况下的辐向应变为解耦所得，故辐向应变仅比较 R12.5 情况下的差异。辐向应变向量计算值与测量值的对比条形图如图 11 所示。可知，辐向应变计算值与测量值吻合较好，表明解耦方法的可行性；其中第 4 根光纤的应变测量值(ϵ_{r4})的绝对值偏大，第 5 根光纤的应变测量值(ϵ_{r5})的绝对值偏小，其可能是因为环氧树脂胶涂抹不均匀或产生局部气泡，导致绕组与光纤之间的应变传递系数有差异；后续将对光纤与被测物体间的应变传递机理做进一步研究。

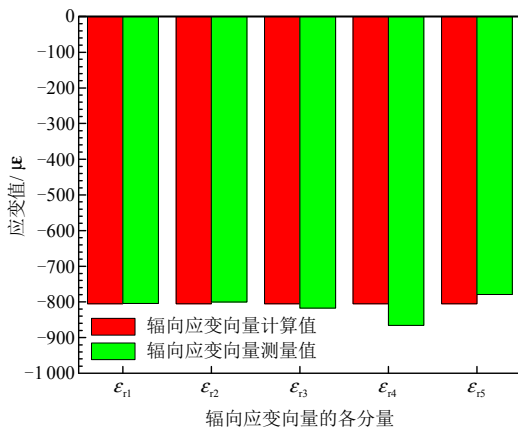


图 11 辐向应变向量计算值与测量值的对比
Fig. 11 Comparison between calculated and measured values of radial strain vector

2) 轴向应变。

绕组线饼在不同轴向挠度下的应变实测曲线如图 12 所示。由图可知，各纤芯的应变基本与位置呈线性关系；因带状光纤布置时偏移-0.82 mm，结合图 9 中带纤布置的示意图可知，此时第 4 根光纤的位置恰好在线饼中间位置附近，故第 4 根纤芯的应变基本为 0，这也从实际说明传统以单根光纤布置于绕组中间的方式无法感知轴向形变。

以应变曲线的峰值为该情况下的应变值，得不同轴向挠度下的应变实测值如表 7 所示。

作出轴向应变向量计算值与测量值的对比 3D 条状图如图 13 所示。由图可见，计算值与测量值

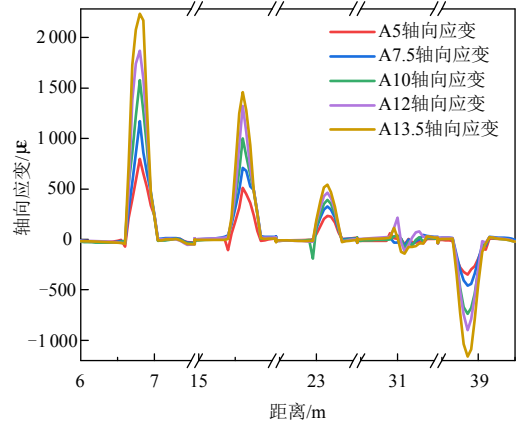


图 12 轴向应变测量曲线
Fig. 12 Axial strain measurement curve

表 7 轴向应变向量测量值

Table 7 Measurement value of axial strain vector

挠度/ mm	轴向应变向量测量值/ $\mu\epsilon$				
	ϵ_{a1}	ϵ_{a2}	ϵ_{a3}	ϵ_{a4}	ϵ_{a5}
A5	805.92	520.70	242.07	-40.91	-342.84
A7.5	1183.34	720.41	333.98	-54.04	-456.38
A10	1592.22	1011.30	398.82	-92.57	-732.15
A12	1881.71	1131.93	471.35	-112.77	-898.78
A13.5	2249.60	1468.80	552.28	-138.61	-1158.8

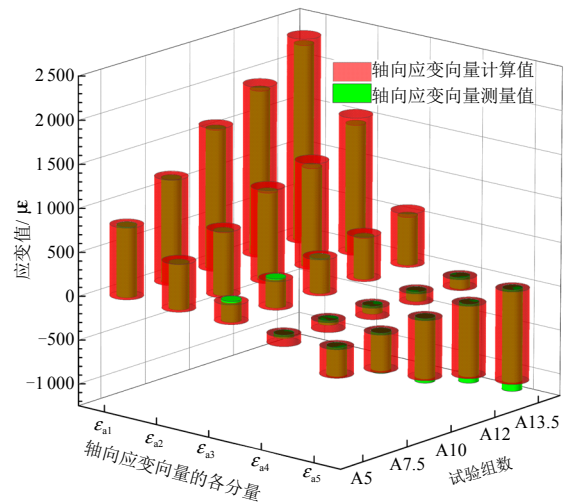


图 13 轴向应变计算值与测量值的对比
Fig. 13 Comparison between calculated and measured axial strain values

整体基本重合，表明轴辐向应变解耦效果良好。

3) 误差定量分析。

为定量表征轴向与辐向应变解耦的误差，需分别计算相对误差。计算表达式与结果分别如式(17)及表 8 所示。

$$\delta = \frac{d(\mathbf{\epsilon}, \mathbf{\epsilon}^*)}{\|\mathbf{\epsilon}^*\|_2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\epsilon_i - \epsilon_i^*)^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^N \epsilon_i^{*2}} \quad (17)$$

式中： δ 为相对误差； $\mathbf{\epsilon}$ 为应变向量的计算值； $\mathbf{\epsilon}^*$

表8 应变向量的相对误差

Table 8 Relative error of strain vector			
辐向 挠度/mm	辐向应变向量 相对误差/%	轴向 挠度/mm	轴向应变向量 相对误差/%
R12.5	3.73	A5	7.16
		A7.5	5.02
		A10	3.64
		A12	3.10
		A13.5	2.52

为应变向量的实测值; $d(\cdot)$ 表示取两向量的距离; $\|\cdot\|_2$ 表示取向量的2-范数。

由表8可知,应变向量的相对误差最大为7.16%。当轴向挠度(形变)增大时,轴向应变向量的相对误差 δ_a 逐渐减小。这是因为BOTDA设备测量应变的绝对误差基本恒定,当测量值增大时,相对误差自然逐渐减小;从图13也可看出,在每种形变情况下,红色与绿色圆柱体的高度差大致相同,这也表明应变向量的绝对误差大致恒定,其相对误差随应变绝对值增大而减小。

3.3 基于带纤应变的绕组挠度定量判断

通常度量弯曲变形的两个基本量为挠度与转角^[25]。解耦得到带纤测得的绕组轴向应变与辐向应变后,并不知晓绕组的实际变形程度。欲根据应变得知绕组的变形程度(以挠度作为指标),需分别研究解耦后的轴向、辐向应变与绕组挠度的关系。

为减小测量过程中的偶然误差,采用5根光纤的平均应变大小作为带纤的应变。定义带纤的平均应变为

$$\varepsilon = \frac{1}{5}(|\varepsilon_1| + |\varepsilon_2| + |\varepsilon_3| + |\varepsilon_4| + |\varepsilon_5|) \quad (18)$$

式中 $\varepsilon_i(i=1, 2, 3, 4, 5)$ 为第*i*根光纤的应变值。

为探究对绕组变形程度定量判断的可行性与效果,本文使用4组数据进行曲线拟合,确定挠度-应变关系,再用1组数据进行验证性实验,检验由函数关系得到的绕组挠度与实测值是否相同。轴向变形信息见表5,表中A12为验证组,其他组用于曲线拟合,其中应变大小均值按式(18)求得。拟合及预测结果如图14所示。

通过图14中函数关系可知,A12时的轴向挠度预测值为11.473 mm,与实际测量值12 mm的相对误差为4.39%。

辐向变形信息见表6,其中前4组作为拟合数据,解耦得到的A12.5辐向应变作为验证组,拟合及预测结果如图15所示。

由图15可知,R12.5时的辐向挠度预测值为

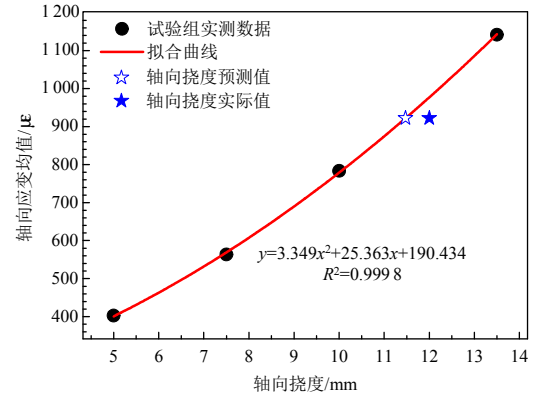


图14 轴向挠度预测

Fig. 14 Axial deflection prediction

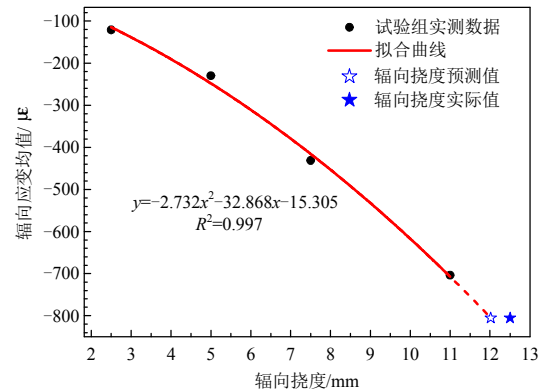


图15 辐向挠度预测

Fig. 15 Radial deflection prediction

12.020 mm,与实际测量值12.5 mm的相对误差为3.84%。综上,使用二次函数关系可以很好地描述绕组挠度与光纤应变的关系,能够实现对绕组变形程度的定量判断,且对绕组挠度的预测相对误差不超过5%,具有工程应用的价值与前景。

4 结论

本文提出一种基于带状光纤的变压器绕组变形检测手段,其中包含轴向与辐向应变解耦方法,以实现了对变压器绕组轴向和辐向变形的区分测量,得到主要结论如下:

1) 从理论上分析绕组线饼弯曲时带纤的应变分布规律,得出当绕组发生辐向变形时,带纤各纤芯的应变值相等;当发生轴向变形时,带纤各纤芯的应变值与纤芯位置呈等差数列分布;当带纤的中心位于线饼中性层时,所有纤芯的轴向应变之和为0;当带纤偏离绕组中性层时,所有纤芯的轴向应变均发生相等的偏移。根据该分布规律,提出应变向量的概念及绕组轴向与辐向应变解耦方法。传统光纤测量方法对轴向形变感知失效,但所提应变解耦方法不受影响。

2) 搭建基于带纤的分布式应变检测平台, 对 1 台 35 kV 连续式绕组模型同时施加轴向和辐向变形, 并对测量到的总应变解耦。试验结果表明, 所提出的绕组轴向与辐向应变解耦方法效果良好, 能在同时发生轴向、辐向变形时, 计算出轴向、辐向应变的大小, 相对误差最大为 7.16%, 且相对误差随着形变量的增大逐渐减小。

3) 提出应变-挠度的预测方法。对解耦得到的应变-挠度关系研究结果表明, 绕组轴向、辐向应变的带纤测量值与挠度均呈二次函数关系, 拟合优度大于 0.99, 并通过这一关系预测绕组挠度, 预测值与实际值误差在 5% 以内, 具有一定工程参考价值。

参考文献

- [1] 辛保安, 李明节, 贺静波, 等. 新型电力系统安全防御体系探究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5723-5731.
XIN Baoan, LI Mingjie, HE Jingbo, et al. Research on security defense system of new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5723-5731(in Chinese).
- [2] 国家能源局. DL/T 911—2016 电力变压器绕组变形的频率响应分析法[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
National Energy Administration. DL/T 911—2016 Frequency response analysis on winding deformation of power transformer[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016(in Chinese).
- [3] SHI Yuhang, JI Shengchang, ZHANG Fan, et al. Application of operating deflection shapes to the vibration-based mechanical condition monitoring of power transformer windings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2164-2173.
- [4] 尚星宇, 庞磊, 卜钦浩, 等. 大功率高频变压器绝缘问题研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 3306-3327.
SHANG Xingyu, PANG Lei, BU Qin hao, et al. Research review on insulation issues of high-power high-frequency transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3306-3327(in Chinese).
- [5] 沈明, 尹毅, 吴建东, 等. 变压器绕组变形在线监测实验研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 184-190.
SHEN Ming, YIN Yi, WU Jiandong, et al. Experimental investigating on on-line monitoring of winding deformation of power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 184-190(in Chinese).
- [6] 程养春, 刘向东, 问耀文, 等. 变压器绕组频响电流信号带电检测中工频电流干扰抑制方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024[2024-06-10]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240242>.
CHENG Yangchun, LIU Xiangdong, WEN Yaowen, et al. Method to suppress power frequency current interference in on-line detection of frequency response current signal in transformer windings[J]. Proceedings of the CSEE, 2024[2024-06-10](in Chinese). <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240242>.
- [7] 刘勇, 汲胜昌, 杨帆, 等. 检测变压器故障的扫频阻抗法特性研究及应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3237-3245.
LIU Yong, JI Shengchang, YANG Fan, et al. Characteristics and application of sweep frequency impedance method for detecting transformer fault[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3237-3245(in Chinese).
- [8] 刘勇, 杨帆, 张凡, 等. 检测电力变压器绕组变形的扫频阻抗法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4505-4516.
LIU Yong, YANG Fan, ZHANG Fan, et al. Study on sweep frequency impedance to detect winding deformation within power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4505-4516(in Chinese).
- [9] REN Fuqiang, JI Shengchang, LIU Yong, et al. Application of Gauss - Newton iteration algorithm on winding radial deformation diagnosis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1736-1746.
- [10] GOLSORKHI M S, HEJAZI M S A, GHAREHPETIAN G B, et al. A feasibility study on the application of radar imaging for the detection of transformer winding radial deformation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2113-2121.
- [11] 赵晓震, 吴歌, 王建, 等. 基于频响重构和数字图像处理的变压器绕组变形故障诊断方法[J/OL]. 高电压技术, 2024[2024-09-22]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240694>.
ZHAO Xiaozhen, WU Ge, WANG Jian, et al. Fault Diagnosis method of transformer winding deformation based on frequency response reconstruction and digital image processing[J]. High Voltage Engineering, 2024[2024-09-22](in Chinese). <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240694>.
- [12] 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.
FENG Yi, DU Haoyang, LI Yimu, et al. Transformer winding deformation detection technology based on pulse coded excitation ultrasonic spread spectrum measuring distance[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3960-3969(in Chinese).
- [13] 田源. 基于分布式光纤传感的变压器绕组变形检测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
TIAN Yuan. Research on transformer winding deformation detection method based on distributed optical fiber sensing[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2019(in Chinese).
- [14] 王玉伟, 余俊龙, 彭平, 等. 基于多模型融合的变压器故障在线检测方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(8):

- 3415-3424.
WANG Yuwei, YU Junlong, PENG Ping, et al. Online detection method for transformer faults based on multi-model fusion[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3415-3424(in Chinese).
- [15] 刘云鹏, 王博闻, 李欢, 等. 结合载纤绕组形变测量法的大型变压器绕组多次短路冲击暂态声纹特征[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 434-446.
LIU Yunpeng, WANG Bowen, LI Huan, et al. Transient acoustics characteristics of large transformer windings under multiple short-circuit impulse combined with fiber-carrying winding deformation measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 434-446(in Chinese).
- [16] 徐征宇, 李鹏, 李林达, 等. 基于等效短路试验的变压器用层压垫块累积效应[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4535-4544.
XU Zhengyu, LI Peng, LI Linda, et al. Cumulated effect of spacers in transformers based on equivalent short-circuit test[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4535-4544(in Chinese).
- [17] WANG Benzhang, HUA Zijie, PANG Chao, et al. Fast Brillouin optical time-domain reflectometry based on the frequency-agile technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(4): 946-952.
- [18] 张旭革. 全分布式光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
ZHANG Xuping. Fully distributed optical fiber sensing technology[M]. Beijing: Science Press, 2013(in Chinese).
- [19] 邓建钢, 王立新, 聂德鑫, 等. 内置光纤光栅油浸式变压器的研制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 160-167.
DENG Jiangang, WANG Lixin, NIE Dexin, et al. Development of oil-immersed transformers with built-in fiber Bragg grating sensors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 160-167(in Chinese).
- [20] MA Guoming, WANG Yuan, QIN Weiqi, et al. Optical sensors for power transformer monitoring: a review[J]. High Voltage, 2021, 6(3): 367-386.
- [21] 刘云鹏, 步雅楠, 田源, 等. 基于分布式光纤传感的变压器绕组变形检测与故障识别可行性研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1483-1489.
LIU Yunpeng, BU Yanan, TIAN Yuan, et al. Feasibility study on transformer winding deformation detection and fault identification based on distributed optical fiber sensing[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1483-1489(in Chinese).
- [22] LIU Yunpeng, TIAN Yuan, FAN Xiaozhou, et al. Detection and identification of transformer winding strain based on distributed optical fiber sensing[J]. Applied Optics, 2018, 57(22): 6430-6438.
- [23] MA Guoming, LIU Yunpeng, LI Yabo, et al. Optical frequency-response analysis for power transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1562-1570.
- [24] 徐征宇, 张书琦, 廖和安, 等. 传感光纤与变压器电磁线一体化技术[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6816-6826.
XU Zhengyu, ZHANG Shuqi, LIAO He'an, et al. Integrated technology of distributed optical fiber and transformer electromagnetic wire[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6816-6826(in Chinese).
- [25] 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.
XU Zhengyu, LI Peng, ZHANG Shuqi, et al. Transformer winding deformation location based on distributed optical fiber[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3224-3230(in Chinese).
- [26] 刘云鹏, 李欢, 田源, 等. 基于分布式光纤传感的绕组变形程度检测[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 1347-1355.
LIU Yunpeng, LI Huan, TIAN Yuan, et al. Winding deformation detection based on distributed optical fiber sensing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7): 1347-1355(in Chinese).
- [27] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2014: 169-176.
XIE Yucheng. Power transformer manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2014: 169-176(in Chinese).
- [28] HU D J J, HUMBERT G, DONG Hui, et al. Review of specialty fiber based Brillouin optical time domain analysis technology[J]. Photonics, 2021, 8(10): 421.
- [29] 徐鹏柏, 王晓龙, 温坤华, 等. 基于BOTDA的分布式光纤高温传感研究(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 20220549.
XU Pengbai, WANG Xiaolong, WEN Kunhua, et al. Distributed fiber high-temperature sensing based on BOTDA(invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(10): 20220549(in Chinese).
- [30] 刘鸿文. 材料力学 II[M]. 6版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
LIU Hongwen. Mechanics of Materials II[M]. 6th ed. Beijing: Higher Education Press, 2017(in Chinese).



李东阳

在线出版日期: 2024-01-08.

收稿日期: 2023-09-05.

作者简介:

李东阳(1997), 男, 博士研究生, 主要从事电气设备在线监测及其多物理场建模和仿真研究, lidongyang@ncepu.edu.cn;

*通信作者: 刘云鹏(1976), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为特高压输电及电力设备故障检测与诊断, liuyunpeng@ncepu.edu.cn.

(编辑 胡琳琳, 张蕾)