

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.012

基于分布式光纤传感的变压器绕组变形检测与故障定位

杨照光¹, 田源², 秦睿¹, 温定筠¹, 刘康¹, 刘云鹏²

(1. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730070; 2. 华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室
河北 保定 071003)

摘要: 绕组变形是变压器内部的常见故障之一, 严重威胁电力系统的安全运行。目前绕组变形检测均属于离线检测, 无法准确定位变形故障; 带电检测由于受现场复杂电磁环境的干扰, 且无法进行变形故障定位。为有效提高绕组变形在线检测的准确性, 本文提出了基于分布式光纤传感的变压器绕组变形故障定位方法。搭建内置分布式光纤连续式绕组模型模拟绕组变形, 当绕组发生局部形变时, 利用布里渊光时域反射计(BOTDR), 对光纤应变进行测量。实验结果表明, 分布式光纤传感技术能够准确的实现绕组变形的故障定位, 具有良好的应用前景。

关键词: 绕组变形; 分布式光纤; 布里渊光时域反射计; 故障定位

Transformer Winding Deformation Detection and Fault Location Based on the Distributed Optical Fiber Sensing

YANG Zhaoguang¹, TIAN Yuan², QIN Rui¹, WEN Dingjun¹, LIU Kang¹, LIU Yunpeng²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730070, China;

2. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defence, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China)

Abstract: Winding deformation is one of the common faults inside the transformer, a serious threat to the safe operation of power systems. The current winding deformation detection are off-line detection, can not accurately locate the deformation fault; live detection due to the interference of the scene of complex electromagnetic environment, and can not be fault deformation positioning. In order to improve the accuracy of on-line detection of winding deformation effectively, this paper presents a fault location method for transformer winding deformation based on distributed optical fiber sensing. The built-in distributed fiber continuous winding model is used to simulate the winding deformation. When the winding is locally deformed, the fiber strain is measured by Brillouin optical time domain reflectometer(BOTDR). The experimental results show that the distributed optical fiber sensing technology can accurately realize the fault location of winding deformation, and have a good application prospect in the monitoring of transformer winding deformation.

Key words: winding deformation; distributed fiber; BOTDR; fault location

0 引言

电力变压器在电力系统中具有重要地位, 其安全运行直接影响着供电的可靠性与安全性^[1]。目前, 在绕组变形检测的研究实践和工程应用中, 国内外主要依据变压器绕组出现变形时的电气参数、

物理尺寸、几何形状及温度等特征量的相对变化, 对绕组状态进行评估。经过国内外的研究者大量理论分析和试验研究, 绕组变形的诊断方法有短路阻抗法^[2-3]、低压脉冲法^[4]、频率响应分析法^[5-6]和振动法^[7]。

短路阻抗法(SCR法)最早应用, 主要反映绕组之

间、绕组内部、绕组和油箱之间的漏磁通形成的感应磁势。能够有效检测短路阻抗, 比较短路前后的阻抗水平, 实现对绕组变形状态^[8]的判定。但短路实验法对绕组的轻微变形不敏感, 不能实现故障定位^[9]。低压脉冲法(LVI法)最早由波兰的 Lech 和 Tyminski 提出并进行使用, 该方法弥补了短路阻抗法灵敏度不高的缺陷, 能检测 2~3 mm 绕组微小变形。但在实际应用中易受现场电磁干扰的影响, 测量结果可重复性较差。频率响应分析法检测变压器绕组变形最早于 1978 年加拿大的 Dick 提出^[10], 因其重复性好, 灵敏度高等优点得到各国研究人员的广泛关注。但是仅能进行离线测试, 尚受测试现场电磁干扰的影响, 对绕组首端位置的故障响应不灵敏, 难以准确定位变形。振动法通过安置在变压器油箱上的振动传感器获取振动信号的频谱、功率谱^[11]等。振动法虽然可以做到在线监测, 但若变压器发生短路故障, 将会危及传感器及人身安全, 该方法目前正处于研究阶段, 并未得到广泛实施^[12-13]。

由于离线检测难以满足电气设备在线监测与状态评估的发展趋势, 越来越多的学者致力于研究变压器绕组变形带电检测技术的可能性。伊朗学者 BEHJAT V 等提出利用 Rogowski 线圈和自行研制的非侵入电容传感器(noninvasive capacitor sensor, NICS), 结合网络分析仪来测量绕组的变形情况^[14]; 加拿大 PowerTech Labs 公司的 WANG M 利用电力系统暂态过电压信号进行变压器绕组变形的在线检测研究^[15]; 英属哥伦比亚大学的 RYBEL T D 研究从套管末屏向绕组注入高频脉冲信号实现脉冲频率响应法的在线应用^[16]。但由于带电检测时现场复杂的电磁干扰, 目前带电检测变压器绕组变形方法还存在抗干扰能力弱, 重复性差, 受测量导线分布、穿心式电流互感器位置、地线长度等因素影响较大, 且无法进行变形故障定位和变形程度的定量判断。

分布式光纤传感技术是伴随着光导纤维及光纤通信技术迅速发展起来的以光为载体、光纤为媒质、感知和传输外界信号的新型传感技术。与传统的机械型传感器、电气型传感器相比主要有以下几个特点: 高灵敏性和分辨率^[17]; 传感头结构简单, 尺寸小, 重量轻, 适合敷设在绕组表面; 耐温性能好; 频率数量级为 1 014 Hz, 从而使传感器频带范围很宽, 动态范围很大; 抗电磁干扰性, 抗腐蚀性能强; 传输距离远, 且便于与计算机和光纤传输系统相连, 易于实现系统的遥测^[18]和控制。目前, 光纤传感器因其高绝缘、稳定、高介电强度等性能被广泛应用于建筑^[19-20]、桥梁、高压输电线覆冰状态监测^[21]、光

纤复合式电缆^[22-23]、架空地线等状态检测。

因此, 利用光纤传感器定位绕组变形故障具有非常广阔的应用前景, 目前尚未发现关于这方面的研究。文中基于布里渊散射原理, 设计并制作了内置分布式光纤连续式绕组模型模拟绕组变形, 进行了相关实验, 提出了采样点导致误差的修正方法, 实现了绕组故障变形的准确定位, 为变压器绕组变形故障定位提供了一种新的技术手段。

1 基于布里渊散射的分布式光纤应变检测原理

1.1 布里渊散射原理

布里渊光时域反射计(Brillouin optical time domain reflectometer, BOTDR)和布里渊光时域分析仪(Brillouin optical time domain analyzer, BOTDA)都能够实现分布式光纤应变和温度的同时检测, 但相比于后者, 基于自发布里渊散射的 BOTDR 传感系统具有单端入射, 分布式测量等优点, 能够实现绕组变形分布式监测。其基本原理见图 1。在光纤一端注入频率为 f 的脉冲光, 可以获得中心频率为 $f-f_b$ 的背向布里渊散射信号, 其中 f_b 为布里渊频移。通过对这一微弱信号的探测和处理, 即可通过自发布里渊散射的频移或强度等参量实现对应变的分布式传感。

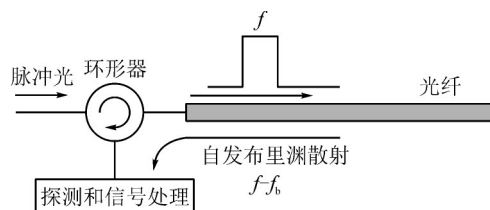


图1 BOTDR检测原理

Fig. 1 Trap energy distribution in polymer

布里渊散射效应是光纤中注入的光波场与其中的弹性声波场之间的相互耦合作用产生的一种非线性光散射现象, 布里渊散射相对于入射光频率的变化量称为布里渊频移。布里渊频移和强度与光纤材料中的声速有关, 声速会受到光纤材料的热光效应和弹光效应的影响, 而热光效应和弹光效应与光纤材料的折射率、杨氏模量、泊松比和密度有关, 所以光纤中温度和应变的变化都会引起布里渊频移的变化, 见式(1)。

$$v_B(T, \varepsilon) = v_{B0}(T_0, \varepsilon_0) + C_{vT} \Delta T + C_{v\varepsilon} \Delta \varepsilon \quad (1)$$

式(1)中: v_B 为光纤在温度 T 和应变 ε 下的布里渊频移; v_{B0} 为光纤在初始温度 T_0 和初始应变 ε_0 下的布里渊频移; C_{vT} 、 $C_{v\varepsilon}$ 为布里渊频移的温度系数

和应变系数。

1.2 基于布里渊散射的绕组变形故障定位原理

变压器在受到短路故障产生的短路电动力冲击或是在运输过程中受到碰撞时,绕组可能发生机械变形。将光纤埋入绕组导线并与导线共同绕制,当导线发生变形时,光纤也随之产生一定的应变,利用布里渊散射原理可检测沿光纤方向分布的应变,通过分析变形前后光纤应变量的变化及突变位置可检测出变压器绕组变形情况,确定绕组变形位置。

基于分布式光纤传感技术的变压器绕组变形故障定位的基本原理是:首先利用基于BOTDR的分布式光纤传感检测系统测量得到正常变压器绕组的光纤应变—距离曲线 $H_0(x)$,并保存数据。假设在变压器遭受短路电流冲击后发生局部形变,再次利用检测系统测量得到变压器绕组此时的光纤应变—距离曲线 $H_1(x)$,将两条曲线 $H_1(x)$ 和 $H_0(x)$ 做差即得到反映变压器绕组变形状态的光纤应变—距离曲线 $\Delta H(x)$ 。由 $\Delta H(x)$ 曲线峰值位置及幅值就可以判断,在经过短路电流冲击后,变压器绕组各个位置是否发生变形;若发生变形,变形位置,变形种类及绕组变形程度。

2 基于分布式光纤传感的绕组变形故障定位关键技术

2.1 分布式光纤在绕组中的布置方式

文中采用在绕组表面贴附光纤的方式进行变形故障定位,设置两根光纤通过导引装置,在绕组扁铜线包裹绝缘纸的过程中,先在导体外包绕两层绝缘纸,将紧套光纤放置于绕组宽面,再包绕2层绝缘纸,用于固定光纤,避免直接接触导线,绕组模型截面图见图2。

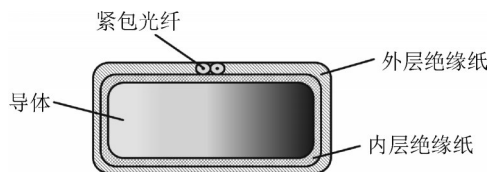


图2 表面敷设光纤的绕组导线截面图

Fig. 2 Cross section of winding wire for surface laying of optical fiber

由于温度和应力的变化都会引起布里渊频移,在变压器运行过程中内部温度会随负荷大小而变化,并且分布不均,因此为消除温度变化对检测结果的影响,需进行分布式应变检测的温度修正。

文中采用并行排列的1根紧套光纤和1根松套光纤共同铺设,保证两根光纤处于相同的温度场中,由于两根光纤采用相同材质的光纤和护套,因

此布里渊温度系数 C_{vT} 一致。利用松套光纤不受应力的特性检测沿光纤长度上的温度造成的布里渊频移,对紧套光纤的检测结果进行温度修正。在忽略温度和应变的耦合作用下,两根光纤的布里渊频移和温度、应变的关系为

$$\Delta\nu_{B1} = C_{vT}\Delta T + C_{v\varepsilon}\Delta\varepsilon \quad (2)$$

$$\Delta\nu_{B2} = C_{vT}\Delta T \quad (3)$$

式(2)、(3)中: $\Delta\nu_{B1}$ 为紧套光纤的布里渊频移变化量; $\Delta\nu_{B2}$ 为松套光纤的布里渊频移变化量。

两式联立可得

$$\Delta\varepsilon = (\Delta\nu_{B1} - \Delta\nu_{B2})/C_{v\varepsilon} \quad (4)$$

因此,通过并列铺设紧套光纤和松套光纤,可直接通过两根光纤的布里渊频移变化值进行计算消除温度变化对检测结果的影响,提高应变检测精确度。

2.2 实验平台搭建

为达到实时在线检测变压器绕组应变并对变形故障做出准确定位,选用内径3 mm×5 mm的带状PVC管代替铜导线,以方便设置变形,见图3。将两根光纤并列紧贴在PVC管宽面中央,用绝缘胶带固定,由于采用PVC代替铜导线,绕组的受力较真实导线相比较小,所以为了得到较为明显的应力分布,将光纤置于绕组外表面。

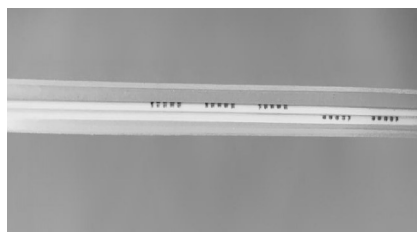


图3 光纤—PVC

Fig. 3 Optical fiber-PVC

最终制成内径300 mm,共18饼,每饼10匝,总长约为165 m的连续式绕组模型,见图4。同时,为了引出传感信号,并且消除首端盲区和尾端反射对测量结果造成的误差,在模型首端尾端分别连接20 m光纤尾纤。在使用光纤敷设PVC外表面制作线圈的过程中,光纤将承受换位,正反饼挤压,拉拽等制作工艺的影响。为确保光纤贴附导线绕制过程中不被损坏,采用BOTDR全程监测光纤应变曲线。在绕制过程中,保持环境恒温25℃,则频移变化只对应于光纤应变的变化。绕组绕制过程中应力监测见图5。绕光纤贴附线圈绕制过程时受到拉伸,应变变化量为1 000~2 500 $\mu\varepsilon$,该应变远小于光纤抗拉强度的允许值,即光纤贴附线圈绕制绕组的过程对光纤强度影响较小,后续实验测试表明了分布式光纤传感器保持了良好的应变监测性能。

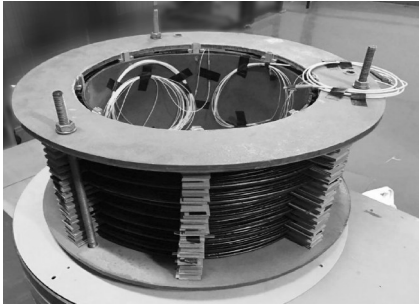


图4 外敷光纤的连续式变压器绕组模型

Fig. 4 Continuous transformer winding model for

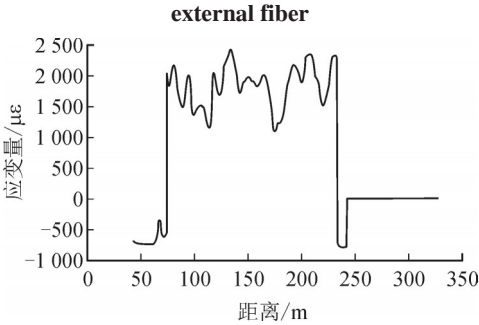


图5 绕组绕制过程应力监测

Fig. 5 Stress monitoring in winding process

相比于桥梁、隧道、电缆等距离尺寸较大的研究对象,变压器绕组长度较短,弯曲半径较小,在遭受短路冲击变形时变形处的弯曲半径可达厘米级。因此选择长飞 G.657A1 型抗拉伸,耐弯曲单模光纤作为传感光纤。护套材料为热塑性聚酯弹性体,该材料具有良好的挠行,弹性以及机械强度,且耐热性能良好,可长期运行在 120 ℃ 环境下,若短期使用,可承受温度更高,在实际变压器内部可保持稳定。BOTDR 选用威海北洋光电生产的分布式光纤应变监测系统,光纤规格和仪器参数设置见表 1。

表1 BOTDR 参数设置

Table 1 BOTDR parameter settings

光纤规格		BOTDR 参数设置	
型号	G.657A1	应变测量范围/%	±1.5
衰减(1 550 nm)/ (dB·km ⁻¹)	≤0.22	光源脉冲宽度/ns	20
包层直径/μm	125	扫频范围/MHz	300
涂覆层直径/μm	250	扫频步长/MHz	5
护套直径/μm	900	计算次数	213
护套材料/μm	Hytrel	测量距离/km	1
允许弯曲半径/mm	10	采样分辨率/m	0.2

BOTDR 技术利用单模光纤作为传感元件,由于采用的光纤材料不同以及不同厂家制作工艺的差异,这导致不同厂家、型号和护套材料的单模光纤性能参数有一定的差异。因此,传感光纤需要经过温度标定和应变标定才能精确定位。文中对使用

的 G657A1 光纤进行了多次标定试验,得到其温度系数 C_T 为 $(0.99 \pm 0.05) \text{ MHz/}^\circ\text{C}$, 应变系数 $C_{V\varepsilon}$ 为 $(0.043 \pm 0.002) \text{ MHz/}\mu\varepsilon$ 。

3 绕组变形故障定位

变压器在运行过程中,会受到光纤传感设备等周围复杂环境的影响,检测数据中含有一定的噪声,影响诊断的准确性。首先对检测信号进行降噪,通过小波变换对检测信号进行预处理,得到一系列的近似信号和细节信号,其中噪声主要存在于细节信号中,采用 rigrsure(无偏风险)处理细节信号,再经软阈值对应变信号进行重构,在不失原有特征的基础上得到较为光滑的信号。通过分布式光纤应变仪检测变形前后绕组的应变情况,考虑到采样时间与曲线光滑度的要求,取 0.5 m 采样分辨率,即每隔 0.5 m 进行一次采样,为了能够进行更加精确地定位,缩小两次采样之间的距离间隔,文中采用 3 次样条插值函数增加采样点数,以缩小采样间距,通过处理,将分辨率提高到 0.079 3 m。

为了获得稳定可靠的传感性能,得到准确的定位,应进行多次连续性循环测试,以消除外界残余应力对光纤的影响。随机选取其中 3 组测试数据,见图 6。由试验结果对比可得,在恒温 25 ℃ 下,传感数据具有较高的重复性。

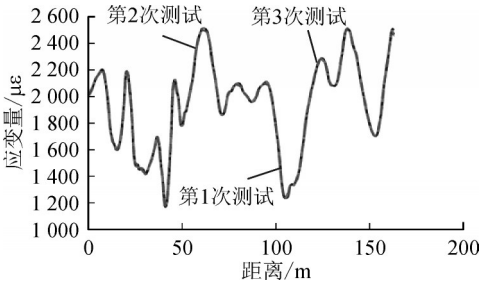


图6 应变变量重复性测试

Fig. 6 Strain variable repeatability test

由于 BOTDR 检测仪器的系统误差,间断性采样会造成数据点的横向纵向偏移,无法进行准确定位。为消除系统误差造成的影响,在上述处理的基础上,以光纤预应力应变曲线作为基准,欧氏距离

作为判据,即 $d = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{1k} - x_{2k})^2}$ 对变形后的应变曲

线进行平移:比较基准和变形后应变曲线起始位置,若基准曲线位于上方,则将变形曲线向左移动,反之,向右移动。以采样分辨率为移动间距,采样点个数为移动次数,计算每次移动之后两条曲线之间的欧氏距离,距离越小说明变形后曲线距基准曲线越近,与基准曲线对应效果越好,定位越精确。

处理结果见图7。

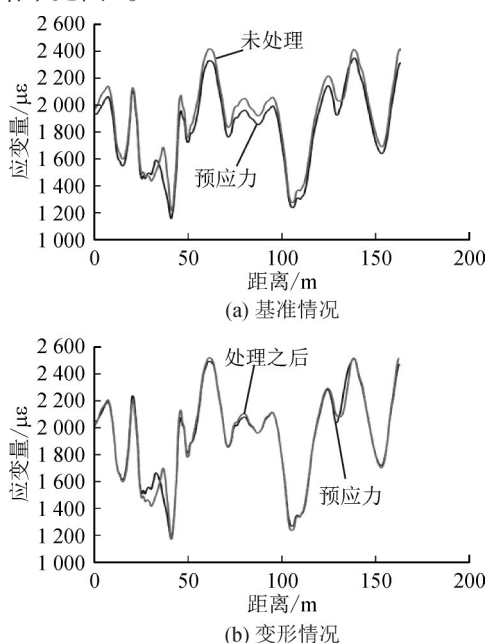


图7 数据处理结果对比

Fig. 7 Comparison of data processing results

为测试内置分布式光纤绕组变形故障定位的可行性,在绕组第3饼某相邻垫块间线圈设置内凹变形,在第12饼某相邻垫块间线圈设置鼓包变形,变形程度均为5 mm。通过分布式光纤应变仪检测出两次变形前后绕组应变曲线,见图8。由于导线绕制过程中光纤布置于线圈外表面受拉伸而产生应变,所以预应力曲线的波峰、波谷数与绕组正、反饼数相同。由仿真可知,当导线发生内凹变形时,光纤受挤压力,应变量为负值;当导线发生外凸即鼓包变形时,光纤受拉伸力,应变量为正值。从图8中可以看出,变形后的应变曲线相比原始值在变形位置处应变发生明显变化,且内凹变形导致的应变量为负增长,而鼓包变形导致的应变量为正增长,这与仿真结果一致。由于检测系统存在一定误差,没有发生形变处的应变基本处于 $\pm 30 \mu\epsilon$ 以内,见图9。

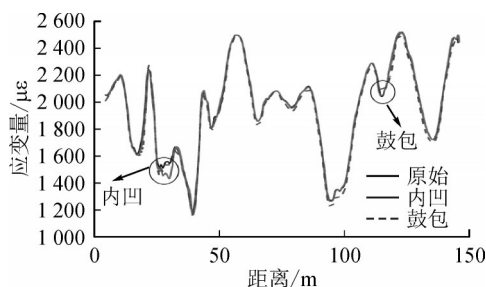


图8 变形前后光纤应变曲线

Fig. 8 Fiber optic strain curve before and after deformation

文中试验中BOTDR光源脉宽设置为20 ns,对应2 m的空间分辨率,则光纤上某点应变的测量值,

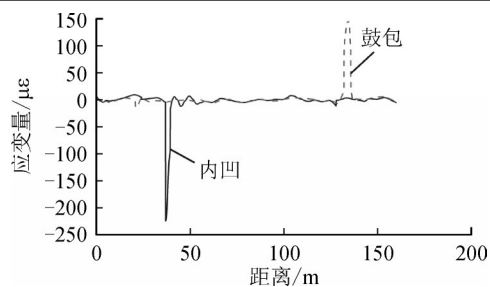


图9 应变变化量曲线

Fig. 9 The strain variation curve

实际上反应的是该点向前2 m内光纤的综合应变。因此光纤应变曲线突变的范围比实际形变范围要大,在进行故障定位时选取应变曲线突出极值点的横坐标确定绕组的变形位置。内凹变形极值点的横坐标为448,即35.504 m,对应第3饼第5匝;鼓包变形极值点的横坐标为1 626,即128.86 m,对应第12饼第6匝,与实际变形位置完全吻合。

改变第3饼线圈变形程度,设置内凹程度分别为5、10、15、20 mm,得到绕组在不同程度应变下的应变变化曲线见图10。

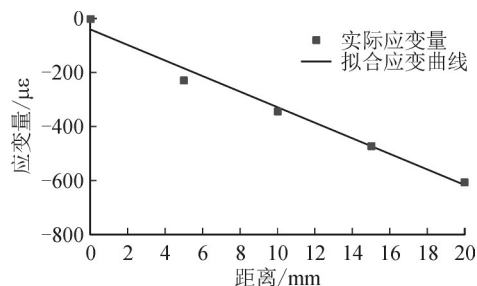


图10 不同程度下应变变化曲线

Fig. 10 The strain variation curve of different displacement

从图10中可以看出,线圈变形程度与应变变化大致成正比,变形程度越大应变变化量越大,因此,在进行变形故障定位的同时,可依据应变曲线突出极值点的纵坐标判断绕组变形程度。

4 结论

基于分布式光纤检测应变原理,设计并制作了内置分布式光纤连续式变压器绕组模型,并进行了相关的测试实验,得到如下结论:

1)设计并制作分布式光纤敷设变压器绕组表面时,应考虑变压器绕组制作过程中对光纤传感器机械强度的影响,并对制作工艺进行适当的改进。

2)光纤敷设线圈外表面绕制绕组过程的监测结果表明,光纤传感器在绕组绕制过程中受到的应力较小,远小于光纤抗拉强度允许值,保持良好的应变监测性能。

3)将导线与光纤贴合同步绕制,可使导线与光纤同步变形。利用光纤应变变化曲线中峰值的位置信息可实现绕组变形故障定位,BOTDR的检测分辨率最高为1 m,可实现对某一饼导线变形的精确定位,提高了变压器绕组变形故障定位的准确性。

参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
ZHAO Wanjun. HVDC engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press,2004.
- [2] 李世军,罗隆福,龙熹,等. 基于新型磁场-电路耦合法的集成滤波电感变压器及滤波系统建模[J]. 高电压技术,2017,43(1):59-66.
LI Shijun, LUO Longfu, LONG Xi, et al. Integrated filter inductor transformer and filter system modeling based on new magnetic field - circuit coupling method[J]. High Voltage Apparatus, 2017,43(1):59-66.
- [3] 欧小波,汲胜昌,彭晶,等. 漏电抗的参数辨识技术在线监测变压器绕组变形的研究[J]. 高电压技术,2010,46(12):41-44.
OU Xiaobo, JI Shengchang, PENG Jing, et al. Study on on-line detecting of transformer winding deformation based on parameter identification of leakage reactance[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 41-44.
- [4] DIEK E P, ERVEN C C. Transformer diagnostic testing by frequency response analysis[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1978,97(6):2144-2153.
- [5] 程文峰,喇元. 变压器绕组频响范测试法相关问题的研究[J]. 电测与仪表,2013,50(6):41-44.
CHENG Wenfeng, LA Yuan. Research on related issues of transformer winding based on frequency response testing method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(6):41-44.
- [6] 刘利鹏,乔玉良,朱永利,等. 电流源法检测绕组变形[J]. 电测与仪表,2014,51(8):56-59.
LIU Lipeng, QIAO Yuliang, ZHU Yongli, et al. The monitoring and diagnosis for transformer winding deformation based on current source method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(8): 56-59.
- [7] 周求宽,万军彪,王丰华,等. 电力变压器振动在线监测系统的开发与应用[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):162-166.
ZHOU Qiukuan, WAN Junbiao, WANG Fenghua, et al. Design and implementation of online vibration monitoring system for power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 162-166.
- [8] 电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则:DL/T 1093—2008[S].2008.
- [9] ABU-SIADA A, ISLAM S M. A novel online technique to detect power transformer winding faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012,27(2):894-857.
- [10] MALEWSKI R, POILIN B. Impulse testing of power transformer using the transfer function method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988,3(2):476-489.
- [11] BAGHERI M, NADERI M S, BLACKBURN T. Advanced transformer winding deformation diagnosis: moving from off-line to on-line[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012,19(6):1860-1870.
- [12] 程锦,汲胜昌,刘家齐,等. 绕组振动信号检测法中测试位置的影响与分析[J]. 高电压技术,2004,30(10):46-48.
JIN Cheng, JI Shengchang, LIU Jiaqi, et al. Influence and analysis of test location in winding vibration detection[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 30(10): 46-48.
- [13] GARCIA B, BURGOS J C, ALONSO A M. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations-Part I:Theoretical foundation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006,21(1):157-163.
- [14] BEHJAT V, VAHEDI A, SETAYESHMEHR A, et al. Diagnosing shorted turns on the windings of power transformers based upon online FRA using capacitive and inductive couplings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 26(4):2123-2133.
- [15] WANG M. Winding movement and condition monitoring of power transformers in service[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2003.
- [16] DE RYBEL T, SINGH A, VANDERMAAR J A, et al. Apparatus for online power transformer winding monitoring using bushing tap injection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009,24(3): 996-1003.
- [17] FU H Y, ZHANG S W, CHEN H, et al. Graphene enhances the sensitivity of fiber-optic surface plasmon resonance biosensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(10):5478-5482.
- [18] 卞继城,郎婷婷,俞文杰. 基于马赫-曾德尔干涉的温度和应变同时测量的光纤传感器研究[J]. 光电子激光, 2015,26(11):2169-2174.
BIAN Jicheng, LANG Tingting, YU Wenjie. Study of fiber sensor for the simultaneous measurement of temperature and strain based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2015, 26(11): 2169-2174.
- [19] 李龙强. 分布式光纤传感技术在地铁隧道监测中的研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2015.
LI Longqiang. Research on distributed optical fiber sensing technology in subway tunnel monitoring[D]. Nanchang: Nanchang Aeronautical University, 2015.

(下转第86页)

- 研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2017.
- YANG Weiguang. Study on the insulation characteristics of the winding of valve side in converter transformer under the action of compound electric field[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology, 2017.
- [15] 侯小默. 换流变压器阀侧电场特性仿真及其影响因素分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2013.
- HOU Xiaomo. Simulation of electric field characteristics on valve side of converter transformer and analysis of its influencing factors[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [16] 吴 锴, 朱庆东, 王浩森, 等. 温度梯度下双层油纸绝缘系统的空间电荷分布特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2366-2372.
- WU Kai, ZHU Qingdong, WANG Haosen, et al. Space charge distribution characteristics of double layer oil paper insulation system under temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9):2366-2372.
- [17] TANG C, CHEN G, FU M, et al. Space charge behavior in multi-layer oil-paper insulation under different DC voltages and temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2010, 17(3):775-784.
- [18] 池明赫, 陈庆国, 王新宇, 等. 温度对复合电压下油纸绝缘电场分布的影响[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1524-1532.
- CHI Minghe, CHEN Qingguo, WANG Xinyu, et al. Influence of temperature on electric field distribution of oil-paper insulation under compound voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6):1524-1532.
- [19] 朱晓伟, 梁榕珊. 温度对油纸绝缘结构的击穿特性影响的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(1):64-68.
- ZHU Xiaowei, LIANG Rongshan. Study on influence of temperature on breakdown characteristic of oil-paper insulation[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2014, 35(1):64-68.
- [20] 朱晓伟. 温度对换流变压器油纸绝缘击穿特性影响的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2011.
- ZHU Xiaowei. Study on the influence of temperature on the breakdown characteristics of oil-paper insulation in converter transformer[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology, 2011.

周 峰(1987—),男,硕士,工程师,主要从事电网设备状态检测与仪器检验等科技研究和管理工。

张丹丹(1968—),女,博士,副教授,主要从事电气绝缘与放电、电气设备的状态监测与信息融合诊断、高电压新技术与应用方面的研究。

(上接第79页)

- [20] 刘冠兰. 地铁隧道变形监测关键技术与分析预报方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2013.
- LIU Guanlan. Study on key technology and analysis and forecast method of deformation monitoring for subway tunnel[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [21] SUN Y J, SHI B, CHEN S, et al. Feasibility study on corrosion monitoring of a concrete column with central rebar using BOTDR[J]. Smart Structures and Systems, 2014, 13(1):41-53.
- [22] 罗建斌. 基于光纤传感技术的高压输电线路覆冰状态监测研究[D]. 广州:华南理工大学, 2013.
- LUO Jianbin. Research on icing condition monitoring of high voltage transmission line based on optical fiber sensing technology[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [23] 吕安强, 李永倩, 李 静, 等. 利用光纤应变判断光电复合海缆锚害程度的有限元分析法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11):261-268.
- LYU Anqiang, LI Yongqian, LI Jing, et al. Finite element analysis of the degree of anchorage of photoelectric composite submarine cable with optical fiber strain[J]. Journal of Electrotechnical Society, 2014, 29(11):261-268.
- 杨照光(1984—),男,硕士,高级工程师,从事电气设备状态检测与诊断技术研究。
- 田 源(1990—),男,博士研究生,从事电气设备状态检测与诊断技术研究。
- 秦 睿(1967—),男,硕士,高级工程师,主要从事风电场机组设备涉网性能检测、智能电网方面的研究。