

基于S变换和ELM的变压器绕组应变检测识别

刘云鹏^{1,2}, 步雅楠², 贺鹏², 田源²

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 目前变压器绕组应变监测主要分为离线检测和在线检测, 由于受现场复杂电磁环境的干扰, 在线检测并未得到广泛应用, 离线检测虽技术较为成熟, 但无法准确判断绕组应变形式。基于以上问题, 文中提出了基于分布式光纤传感的变压器绕组应变检测方法, 并提出了基于S变换和极限学习机(ELM)的绕组应变识别方法。首先模拟变压器运行过程中绕组可能出现的变形形式, 采集相应的布里渊频移; 然后通过S变换对应变信号进行时频分析, 提取变换后的时频特征量作为神经网络的输入样本, 采用极限学习机(ELM)进行训练识别。实验分析表明, 该方法能够有效识别常见绕组变形形式, 识别效果较好, 准确率高。

关键词: 应变检测; 分布式光纤传感; S变换; 极限学习机; 模式识别

Transformer Winding Strain Detection Identification Based on S-transform and ELM

LIU Yunpeng^{1,2}, BU Yanan², HE Peng², TIAN Yuan²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China; 2. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defence, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China)

Abstract: At present, the transformer winding strain monitoring is mainly divided into off-line detection and on-line detection. Due to the interference of the complex electromagnetic environment, on-line detection has not been widely used. Although the off-line detection is more mature, it can not accurately judge the winding strain form. Based on the above problems, this paper presents a strain gage strain detection method based on distributed fiber optic sensing, and proposes a winding strain identification method based on S transform and extreme learning machine (ELM). First, the deformation of the winding in the process of transformer operation is simulated, and the corresponding Brillouin frequency shift is collected. Then, the time-frequency analysis of the strain signal is carried out by S-transform, and the transformed time-frequency feature is extracted as the input sample of the neural network. Extreme learning machine(ELM) for training identification. Experimental results show that the method can effectively identify the common winding deformation form, the recognition effect is better and the accuracy is high.

Key words: strain detection; distributed fiber optic sensing; S-transform; extreme learning machine; pattern recognition

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]。据大数据统计, 绕组是变压器故障率最高的部位。目前, 绕组变形离线检测主要有短路阻抗法^[2-3]、低压脉冲法^[4]、频率响应分析法^[5-6]。但离线检测难以满足电气

收稿日期: 2019-06-20; 修回日期: 2019-08-17

基金项目: 国家电网公司科技项目(524625160020); 中央高校基本科研业务费专项资金(2016XS93, 2017MS102)项目资助。

Project Supported by State Grid Corporation of Science and Technology Project (524625160020), the Central University Basic Scientific Research Business Special Funds (2016XS93, 2017MS102).

设备在线监测与状态评估的发展趋势,并且存在灵敏性较差,不能及时发现绕组变形缺陷。而变压器绕组带电检测,受现场电磁环境因素影响较大,抗干扰能力弱,无法实现变形程度的识别和定量判断。

分布式光纤传感技术利用光纤的低损耗传输特性,通过分析光纤后向散射光的分布变化来检测光纤周围温度、应变等被测物理量分布变化,是一种全分布式光纤传感技术。具有尺寸小,重量轻;耐温性能好;抗电磁干扰性强;传输距离远,便于遥测^[7]和控制等优点。应用范围极广,包括:高压电力电缆^[8]、高压输电线覆冰状态监测^[9];桥梁^[10-12]、高速公路等动态检测、防护及报警^[13-14];火灾监测^[15-16]等。文[17]对内置传感光纤在热老化环境下对变压器油绝缘体系的影响进行了研究,认为敷设带有ETFE护套材料的光纤在130℃环境下对变压器油的影响较小,可内置在变压器中。

极限学习机(ELM)作为近年来研究的热点,具有学习速度快,泛化性能好等优点,已广泛应用于区间预测^[17]、回归分类等领域^[18]。S变换(S-transforms)是由小波变换扩展得来^[19],继承并融合了连续小波变换(CWT)短时傅里叶变换(STFT)的优点,克服了STFT窗函数高度和宽度固定的缺陷^[20],有效提高了时频分辨率,目前被广泛应用在电能质量扰动检测中^[21-25]。因为其良好的时频特性,可将其应用在变压器绕组应变检测中。

文中提出基于分布式光纤传感的变压器绕组应变检测方法,首先利用布里渊光时域反射计(BOTDR)测量变压器绕组应变波形,预处理之后采用S变换提取正常状态、内凹形变、鼓包形变的应变特征量,最后通过极限学习机(ELM)对绕组不同变形方式进行识别。

1 基于分布式光纤传感的变压器绕组状态检测

1.1 布里渊散射原理

布里渊光时域反射计(Brillouin optical time domain reflectometer, BOTDR)是基于自发布里渊散射的传感系统。布里渊散射属于非弹性散射,由光纤中注入的光波场与其中弹性声波场之间相互耦合产生,可实现光纤应变和温度的分布式检测。基本原理见图1。

从光纤一端注入一束频率为 f 的脉冲光,由于受到光纤中声波场的作用,与声子发生非弹性碰撞,产生频率为 $f-f_B$ 的布里渊散射,其中散射光相对于入射光的频移 f_B 被称为布里渊频移。

布里渊频移与光纤折射率、光纤中声波速度有

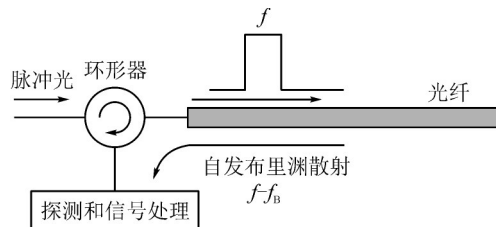


图1 BOTDR检测原理

Fig. 1 Trap energy distribution in polymer

关,而折射率和声速都会受到温度、应力等外界环境的影响。具体表现为光纤的轴向应变和温度与布里渊频移呈一定的线性关系,即

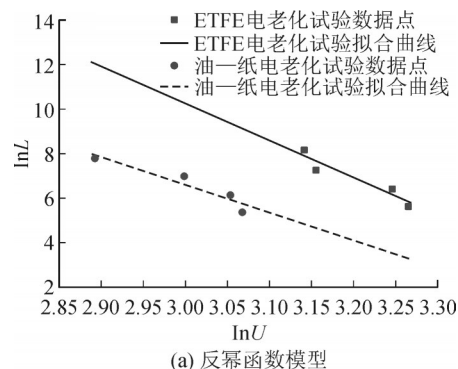
$$v_B(T, \varepsilon) = v_{B0}(T_0, \varepsilon_0) + C_{vT} \Delta T + C_{v\varepsilon} \Delta \varepsilon \quad (1)$$

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。

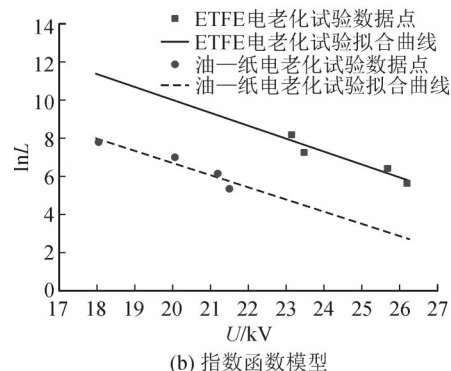
1.2 绝缘性实验验证

将光纤传感器用于检测变压器绕组变形,首要解决的就是光纤传感器及其附属部件在变压器内部的绝缘问题。

文中针对光纤绝缘纸板、乙烯—四氟乙烯共聚物(ethylene tetrafluoroethylene, ETFE)进行了电老化试验。通过双参数威布尔分布对ETFE材料的电老化寿命数据进行统计,得出其寿命模型见图2。横坐标为施加电压,纵坐标为寿命。



(a) 反幂函数模型



(b) 指数函数模型

图2 电老化模型

Fig. 2 Electric aging model

对比 ETFE 与油纸绝缘的电老化模型可得到结论:在经过相同预处理后并处于同等热老化程度、温度的条件下, ETFE 的电老化寿命优于油纸绝缘。可以证明, ETFE 可作为布置在变压器内部的可靠绝缘材料。

1.3 实验平台搭建

文中采用内径 3 mm×5 mm 的带状 PVC 管代替铜导线,以较为方便的设置不同类型绕组变形。由于硬塑料形变与铜导线产生形变对光纤的影响基本相同,故选用此替代实现分布式光纤检测变压器绕组变形具有一定的可行性。另外考虑到采用 PVC 代替铜导线,绕组实际受力较真实导线较小,为得到较为明显的应力分布,将光纤置于绕组外表面,包绕绝缘纸用于固定光纤。最终制成内径 500 mm,共 20 饼,每饼 5 匝,总长为 200 m 的连续式绕组模型,见图 3。同时,为引出传感信号,消除首端盲区和尾端反射对测量结果造成的误差,在模型首尾端分别连接 20 m 光纤尾纤。

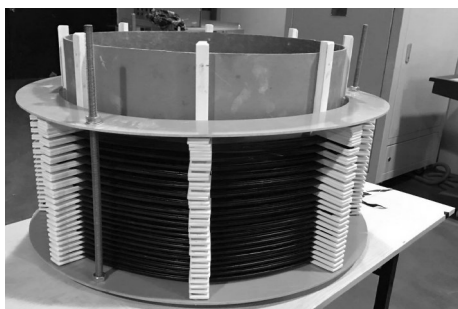


图3 实验平台搭建

Fig. 3 Experimental platform to build

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,在遭受短路冲击时变形处的弯曲半径可达厘米级,因此选择长飞 G657A1 型抗拉伸、耐弯曲单模光纤作为传感光纤。护套材料采用 ETFE,光纤规格见表 1。

BOTDR 技术利用单模光纤作为传感元件,由于光纤材料和制作工艺的差异,不同厂家、型号和护套材料的单模紧套光纤性能参数有一定的差异。因此,实验前需对传感光纤进行温度标定和应变标定试验。文中对使用的紧套光纤进行了多次标定试验,得到其温度系数为 1.32 MHz/℃,应变系数为 0.052 8 με/℃。

因为实验在恒温环境下进行,温度变化不超过 5℃,温度对测量结果影响可忽略不计^[26],布里渊频移与轴向应变呈良好线性关系,即

$$v_B(\varepsilon) = v_{B0}(\varepsilon_0) + C_{\varepsilon} \Delta \varepsilon \quad (2)$$

表1 光纤参数设置

Table 1 Optical fiber parameter settings

名称	参数
型号	G.657A1
衰减(1550 nm)/(dB·km ⁻¹)	≤0.25
包层直径/μm	125
涂覆层直径/μm	250
护套直径/μm	900
护套材料	ETFE
允许弯曲半径/mm	10

2 基于S变换的变压器绕组应变检测

2.1 S变换

S 变换由 R.G.Stockwell Dr 于 1996 年首次提出,是一种可逆的时频研究方法,起源于傅里叶变换^[27-28],也可由小波变换引出,是傅里叶变换和小波变换的延续和创新。下面由小波变换推导 S 变换^[29-30]。

设连续信号 $x(t)$ 的小波变换为

$$WT_x(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{a,\tau} \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad (3)$$

式(3)中: $\psi_{a,\tau} \left(\frac{t-\tau}{a} \right)$ 是小波基函数; τ 为时移因子; a 为尺度因子。基函数选用高斯窗函数 $\psi_{a,\tau}(t) = e^{-t^2/2}/\sqrt{2\pi}$, 则对应小波变换为

$$WT_x(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2a^2}} dt \quad (4)$$

任意信号 $x(t)$ 对应的 S 变换为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi(\tau - t, f) e^{-i2\pi ft} dt \quad (5)$$

$$w(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[-(t-\tau)f]^2}{2}} \quad (6)$$

式(6)中, f 为频率。根据傅里叶变换和卷积理论,可迅速得到 S 变换

$$S_F(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\varphi + f) e^{-\frac{2\pi^2 \varphi^2}{f^2} e^{-i2\pi \varphi \tau}} d\varphi \quad (7)$$

连续信号 $x(t)$ 经等时间间距采样,可分解为离散信号 $x(p)[p=0, T, 2T, \dots, (N-1)T]$, T 为采样周期, N 为样本总量,可计算得到离散信号 $x(p)$ 的 S 变换 $S[m, n]$

$$S[m, n] = \sum_{p=0}^{N-1} x(p) \frac{n}{N\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{n^2(m-p)^2}{2N^2}} e^{-\frac{i2\pi mn}{N}} \quad m, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

由此可以看出,离散信号经 S 变换得到一个复时频矩阵,计为 S 矩阵。对 S 矩阵每个元素求模后得到新矩阵,记为 S 模时频矩阵。该矩阵列向量为时间向量,代表一定时间下信号幅值随频率变化的大小;行向量为频率向量,代表一定频率下信号幅值随时间变化的大小。

在将光纤敷设在带状塑料管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全程监测光纤应力变化,参数设置见表2。

表2 BOTDR参数设置

Table 2 BOTDR parameter settings

名称	参数
应变测量范围/%	± 1.5
光源脉冲宽度/ns	20
扫频范围/MHz	300
扫频步长/MHz	5
计算次数	213
测量距离/km	1
采样分辨率/m	0.5

绕组正常状态应变监测情况见图4。应变变化量为 $0\sim 2\,500\,\mu\varepsilon$,远小于光纤应变检测极限。该信号包含多种频率成分,多频信号源经 S 变换时频图见图5(a)。图5(b)、(c)分别为短时傅里叶变换,Winger-ville分布时频分布图。由图5可知,相比于短时傅里叶变换和Winger-ville分布, S 变换时频分辨率有大幅提升,有利于光纤采集信号的检测。

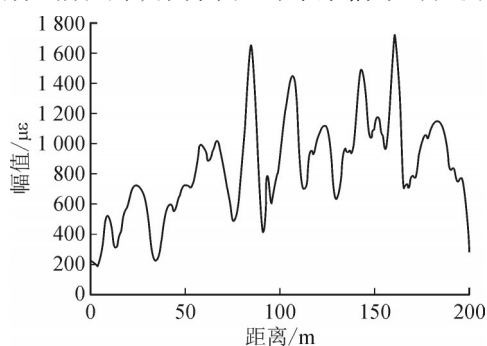


图4 绕组绕制过程应力监测

Fig. 4 Stress monitoring in winding process

2.2 基于 S 变换的变压器绕组应变检测

变压器在受到短路故障产生的短路电动力的冲击或是在运输过程中受到碰撞时,绕组可能产生机械变形。文中针对最常见两种变形内凹、鼓包进行检测,分别设置正常,内凹变形(不同位置),鼓包变形(不同数量)5种状态。检测结果见图6。从图6中可以看出,当绕组发生机械形变时,光纤将随导

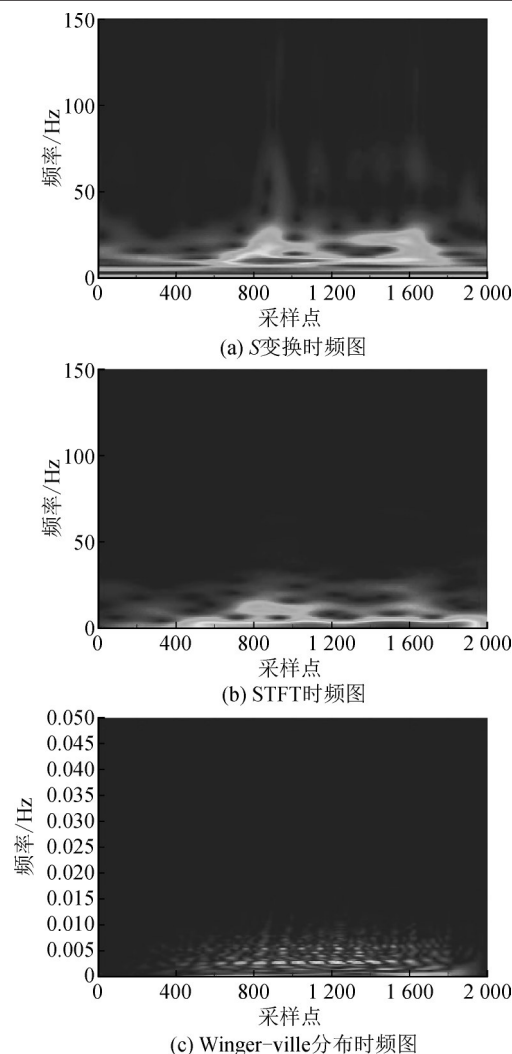


图5 S 变换、STFT、Winger-ville分辨率对比

Fig. 5 S transform, STFT, Wigner-ville resolution comparison

线发生同步变形。当绕组发生内凹变形时,应变量出现负增长,鼓包变形则使应变量出现正增长。这是因为当导线发生内凹变形时,光纤受挤压力,应变量为负值;而发生鼓包变形时,光纤受拉伸力,应变量为正值。

运用 S 变换对内凹,鼓包以及正常状态进行检测分析,变换结果经简单分析处理后得应变信号时频分布图,幅频曲线和幅度—时间曲线。见图7~9。

图7(a)~(c)分别为内凹变形,一处鼓包,两处鼓包时频分布图,从检测输出结果可以看出较正常状态,内凹变形在频率较低部分幅值出现增长,鼓包变形则在频率较高部分幅值出现增长,且随变形点位置的增多,频率较高部分呈累加状态,幅值产生突增。

图8(a)~(c)为正常状态,内凹变形,一处鼓包,两处鼓包幅频曲线对比图,从图8可以更加直观的看出,当出现内凹形变时,与正常状态相比,较低频率

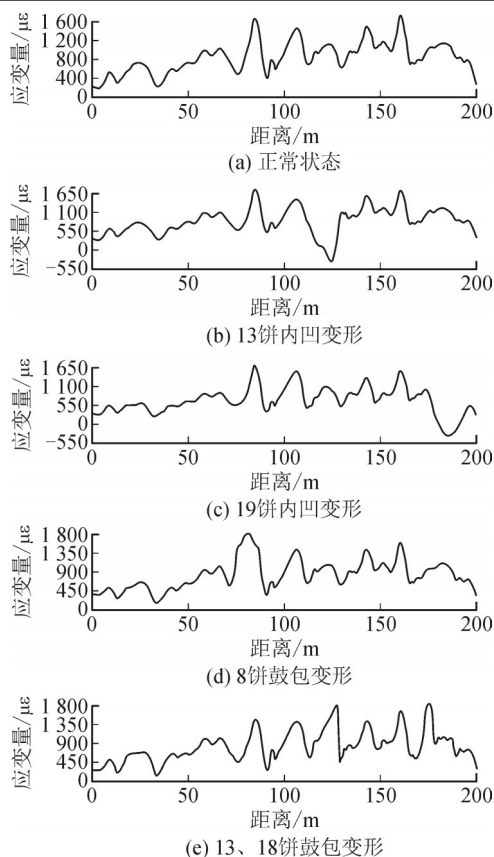


图6 绕组机械变形应变检测信号

Fig. 6 Winding mechanical deformation strain detection signal

处幅值明显增大,频率较高处幅频曲线重合性良好;而当出现鼓包形变时,与原始状态相比,较高频率处幅值增大,频率较低处幅频曲线重合性良好,另变形位置增多时,与原始状态相比,较高频率部分幅值增大更为明显,且向更高频处移动。这样得到的幅频曲线较好的反映了信号的幅频特征,为识别绕组机械变形提供依据。

图9为正常状态,内凹变形,鼓包变形幅度-时间对比图,从检测结果可以发现,内凹变形在0~700采样点以及1100~2000采样点处幅值出现明显下降,而鼓包变形则出现明显上升。

3 基于极限学习机和S变换的变压器绕组应变识别

3.1 基于S变换的特征量提取

特征曲线图中,各曲线图意义如下:

1)图7颜色谱图即时间—频率—幅值三维颜色谱图,其反映着应变信号的幅值,频率等综合信息。

2)图8频率幅值包络线即S模时频矩阵行向量及极大值图,反映的是应变信号的频率变化,可以区分正常状态,一饼形变,多饼形变的信号。

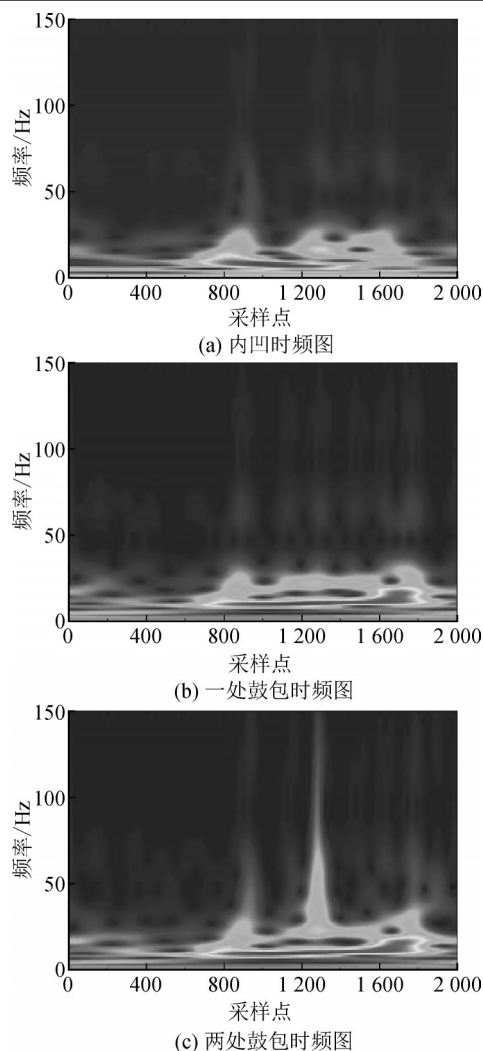


图7 绕组变形时频图

Fig. 7 Winding time-frequency diagram

3)图9时间幅值包络线即S模时频矩阵列向量及极大值图,该包络线可以区分正常状态,内凹形变,鼓包形变的信号。

采集不同状况下光纤方向上的应变曲线,用以提取特征值。变压器在运行过程中,会受到传感设备等周围复杂环境的影响,检测信号中含有一定的噪声,为确保识别的准确性。在提取特征量之前,对检测信号进行预处理。首先提取有效采样点,通过小波变换对应变信号进行降噪,最后增加采样点数,提高采样分辨率,使采样间隔达到0.01 m。

预处理之后,通过对S变换检测结果的分析,针对以上几种典型机械应变,充分考虑各事件特征,提取变压器绕组应变自动识别所需要的各种特征量,包括如下:频谱标准差平方根均值,记为 F_1 ;频率幅值包络线标准差,记为 F_2 ;时间幅值包络线平均能量,记为 T_1 ;时间幅值包络线的平均值,记为 T_2 ;时间幅值包络线标准差,记为 T_3 。

以上特征量计算公式为

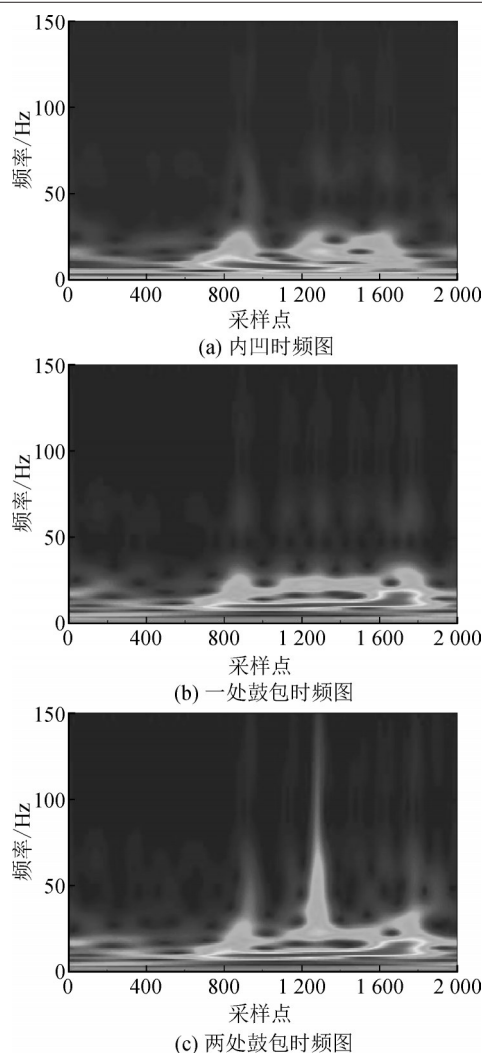


图7 绕组变形时频图

Fig. 7 Winding time-frequency diagram

标准差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N x_i \quad (10)$$

平均能量:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|^2 \quad (11)$$

其中 F_1 、 F_2 为频域特征量; T_1 、 T_2 、 T_3 为时域特征量。共计 5 个特征量, 这些特征量反映了识别正常状态、内凹变形、鼓包变形这 3 种变压器绕组典型状态所需的各种特征, 特征量的提取通过程序自动完成。

3.2 基于 ELM 的绕组应变识别方式

极限学习机(extreme learning machine, ELM)是黄广斌^[31-32]等于 2016 年提出的一种针对单隐含层前馈神经网络(SLFN)的新算法。其结构见图 10。极限

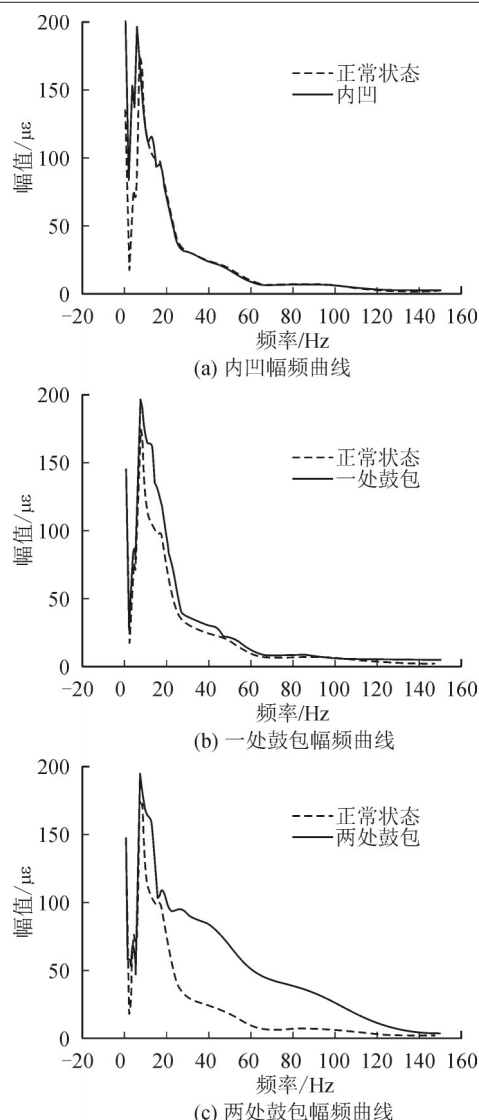


图8 绕组变形幅频曲线

Fig. 8 Winding deformation amplitude-frequency curve

学习机随机产生输入层与隐含层之间的连接权值和隐含层神经元的阈值, 只需确定隐含层神经元个数和激活函数, 仅通过一步计算就可获得隐含层与输出层间的连接权值, 与传统训练方法相比, 大大提高了网络的学习速度和泛化性能。检测识别系统见图 11。

检测结果见表 3。由表 3 可以看出, 文中提出的识别算法可以准确、可靠的检测变压器绕组正常状态和内凹, 鼓包两种典型机械变形, 且不受形变位置, 形变数量的影响。

4 结论

针对变压器绕组传统应变检测方法的不足, 提出了基于分布式光纤传感的变压器绕组应变检测方法, 讨论了基于 S 变换和 ELM 的变压器绕组应变识别方法, 实现了变压器绕组最常见机械变形

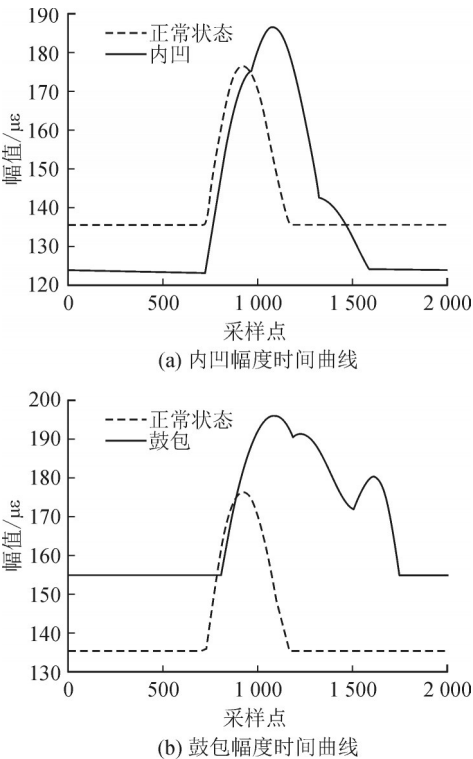


图9 绕组变形幅度时间曲线

Fig. 9 Winding deformation time curve

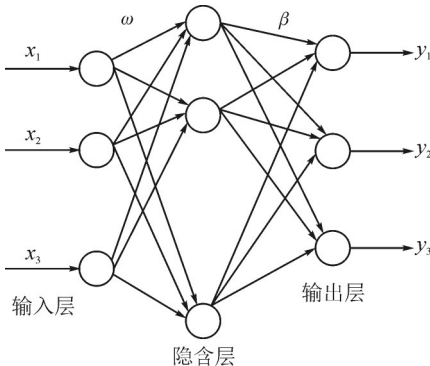


图10 ELM神经网络结构图

Fig. 10 ELM neural network structure

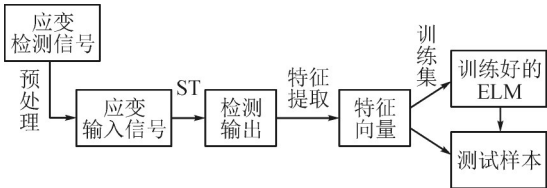


图11 变压器绕组应变检测系统方框图

Fig. 11 Transformer winding strain detection system block diagram

的识别。

1)采用分布式光纤对变压器绕组进行应变检测,可有效检测绕组机械变形,同时光纤的强绝缘特性使得该方法可应用于变压器在线监测领域,弥补了传统测量方法的缺陷。

2)S变换进行绕组应变检测结果直观,由此得到的时频特征较为全面和明显,较好的保证了识别效

表3 检测结果

Table 3 Test results

变形种类	理想分类结果	正确识别数	识别准确率/%
正常状态	正常状态	32/33	94.12
13饼内凹	内凹	50/50	100
19饼内凹			
8饼鼓包	鼓包	41/42	98.4
13、18饼同时鼓包			

果。极限学习机具有很好的泛化性能,学习速度快,识别准确率高。

3)对于绕组不同位置同种变形形式,可准确判断应变类型,且不受应变数量,应变位置的干扰,实现了五种应变信号的识别分类,可很好的应用于变压器绕组在线监测与识别。

参考文献:

[1] 郭新辰,宋 琼,樊秀玲. 基于半监督分类方法的变压器故障诊断[J]. 高电压技术,2013,39(5):1096-1100.
GUO Xincheng, SONG Qiong, FAN Xiuling. Transformer fault diagnosis based on semi-supervised classifying method [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1096-1100.

[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 Engineering, 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 Engineering, 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 moni-

- toring and diagnosis for transformer winding deformation based on current source method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(8): 56-59.
- [7] 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.
- [8] 吴钰骅,沈林冲,金伟良. 长距离光纤传感技术在地铁隧道监测中的应用[J]. 中国市政工程, 2006, 59(6): 61-92.
- WU Yuhua, SHEN Linchong, JIN Weiliang. Application of long - distance optical fiber sensing technology in subway tunnel monitoring[J]. China Municipal Engineering, 2006, 59(6): 61-92.
- [9] 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.
- [10] 罗俊华,邱毓昌,杨黎明. 10 kV 及以上电力电缆运行故障统计分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 14-16.
- LUO Junhua, QIU Yuchang, YANG Liming. Statistical analysis of operation fault of 10 kV and above power cables [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(6): 14-16.
- [11] 罗俊华,周作春,李华春,等. 电力电缆线路运行温度在线检测技术应用研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 169-172.
- LUO Junhua, ZHOU Zuochun, LI Huachun, et al. Study on application of on - line detection technology for power line running line of power cable[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 169-172.
- [12] 罗俊华,杨黎明,史济康,等. 电力电缆及试验技术回顾[J]. 高电压技术, 2004(s1): 81-82.
- LUO Junhua, YANG Liming, SHI Jikang, et al. Review of power cables and test technology[J]. High Voltage Engineering, 2004(s1): 81-82.
- [13] 罗俊华,马翠姣,邱毓昌,等. 35 kV 及以下 XLPE 电力电缆试验方法的研究[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 58-61.
- LUO Junhua, MA Cuijiao, QIU Yuchang, et al. Research on test method of XLPE power cable for 35 kV and below [J]. Power Grid Technology, 2000, 24(12): 58-61.
- [14] 卢毅,施斌,魏广庆. 基于BOTDR与FBG的地裂缝定点分布式光纤传感监测技术研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 51(2): 103-109.
- LU Yi, SHI Bin, WEI Guangqing. Research on distributed optical fiber sensing monitoring technology for ground fissures based on BOTDR and FBG[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 51(2): 103-109.
- [15] 张春熹,史洁琴,段靖远. 航空电子系统的光纤网络结构与技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(11): 1390-1394.
- ZHANG Chunxi, SHI Jieqin, DUAN Jingyuan. Fiber optic network structure and technology of avionics system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11): 1390-1394.
- [16] 林晓艳,梁艺军,郑伟绩. 光纤智能皮肤的理论与实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, 24(1): 84-87.
- LIN Xiaoyan, LIANG Yijun, ZHENG Weiji. Theoretical and experimental research on fiber optic skin[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2000, 24(1): 84-87.
- [17] 刘云鹏,田源,姜烁,等. 光纤护套材料对变压器油热老化特性研究[J]. 绝缘材料, 2017, 50(12): 54-59.
- LIU Yunpeng, TIAN Yuan, JIANG Shuo, et al. Effect of optical fiber sheath on thermal ageing characteristics of transformer oil[J]. Insulation Materials, 2017, 50(12): 54-59.
- [18] 杨锡云,关文渊,刘玉奇,等. 基于粒子群优化的核极限学习机模型的风电功率区间预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 35(s1): 146-153.
- YANG Xiyun, GUAN Wenyuan, LIU Yuqi, et al. Wind power interval estimation method based on particle swarm optimization for nuclear limit learning model[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 35(s1): 146-153.
- [19] 常玉清,李玉朝,王福利,等. 基于极限学习机的生化过程软测量建模[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(23): 5587-5590.
- CHANG Yuqing, LI Yuzhao, WANG Fuli, et al. Soft sensing modeling based on extreme learning machine for biochemical processes[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(23): 5587-5590.
- [20] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: The S transform[J]. IEEE Transactions on Signal Process, 1996, 44(4): 998-1001.
- [21] 全慧敏,戴瑜兴. 基于S变换模矩阵的电能质量扰动信号检测与定位[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 119-125.
- QUAN Huimin, DAI Yuxing. Detection and localization of power quality disturbances based on S - transform module matrixes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 119-125.
- [22] 徐健,张语勃,李彦斌,等. 短时傅里叶变换和S变换用于检测电压的对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 43(24): 44-48.
- XU Jian, ZHANG Yuqing, LI Yanbin, et al. Comparative study of STFT and S transform on detecting voltage sag[J]. Power System Protection and Control, 2014, 43(24): 44-48.
- [23] 占勇,程浩忠,丁屹峰,等. 基于S变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 51-56.
- ZHAN Yong, CHENG Haozhong, DING Yifeng, et al. S -

- transformer - based classification of power quality disturbance signals by support vector machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 51-56.
- [24] DASH P K, PANIGRAHI B K, PANDA G. Power quality analysis using *S*-transformer[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 406-411.
- [25] LEE I W, DASH P K. *S*-transformer based intelligent system for classification of power quality disturbance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(4): 800-805.
- [26] MISHRA S. Detection and classification of power quality disturbances using *S*-transform and probabilistic neural network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 280-287.
- [27] 张 丹, 施 斌, 吴智深, 等. BOTDR 分布式光纤传感器及其在结构健康监测中的应用[J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 83-87.
- ZHANG Dan, SHI Bin, WU Zhishen, et al. Distribution optical fiber sensor based on BOTDR and its application to structural health monitoring[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11): 83-87.
- [28] HE S F, LI K C, ZHANG M. A real-time power quality disturbances classification using hybrid method based on *S*-transform and dynamics[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(9): 2465-2475.
- [29] YAO W X, TANG Q, TENG Z S, et al. Fast *S*-transform for time-varying voltage flicker analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(1): 72-79.
- [30] 陈学华, 贺振华, 黄德济. 广义 *S* 变换及其时频滤波[J]. 信号处理, 2008, 24(1): 28-31.
- CHEN Xuehua, HE Zhenhua, HUANG Deji. Generalized *S* transform and its time-frequency filtering[J]. Signal Processing, 2008, 24(1): 28-31.
- [31] 尹柏强, 何怡刚, 吴先明. 心磁信号广义 *S* 变换域奇异值分解滤波方法[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 8702.
- YIN Boqiang, HE Yigang, WU Xianming. A method for magnetocardiograms filtering based on singular value decomposition and generalized *S*-transform[J]. Acta Physical Scientia, 2013, 62(14): 8702.
- [32] HUANG G B, WANG D H, LAN Y. Extreme learning machines: a survey[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2011, 2(2): 107-122.

刘云鹏(1976—), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为特高压输电技术、电气设备在线监测。