

# 基于灰色关联与时-频域介电响应的油纸绝缘受潮状态快速评估方法

姚欢民<sup>1</sup>, 穆海宝<sup>1</sup>, 张大宁<sup>1</sup>, 马奎<sup>2</sup>, 刘焱<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750000)

**摘要:**受潮状态下油纸绝缘的等效扩展 Debye 模型不再具有线性特性,使得基于时频转换的油纸绝缘状态评估方法存在一定误差。本文综合时域与频域介电谱的优点,在获取时-频域介电响应参数的基础上使用灰色关联算法构建油纸绝缘受潮状态评估模型。首先制备不同含水量的油纸绝缘样品,分析了受潮和温度对极化去极化电流(polarization and depolarization current, PDC)以及频域介电谱(frequency domain spectroscopy, FDS)曲线的影响,进一步提取不同受潮状态下 PDC 和 FDS 曲线的特征参数。在此基础上,采用灰色关联算法整合油纸绝缘时频域介电特征量得到其规范化后的参考向量。最后,分别通过实验室样品数据和现场变压器数据验证了评估模型的准确性,为变压器早期故障预警与诊断提供了新方法。

**关键词:**油纸绝缘;时-频域转换;灰色关联;受潮和温度;故障诊断

中图分类号: TM855 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.03.009

## Rapid evaluation method of oil-paper insulation damp condition based on grey correlation and time-frequency domain dielectric response

YAO Huanmin<sup>1</sup>, MU Haibao<sup>1</sup>, ZHANG Daning<sup>1</sup>, MA Kui<sup>2</sup>, LIU Yao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, China; 2. State Grid Ningxia Power Supply Company, Yinchuan 750000, China)

**Abstract:** The equivalent extended Debye model of oil-paper insulation in the damp state no longer has linear characteristics, which makes the evaluation method of oil-paper insulation based on time-frequency conversion have errors. In this paper, the advantages of time domain and frequency domain dielectric spectroscopy were integrated, and the grey correlation algorithm was used to construct the evaluation model of oil-paper insulation damp condition on the basis of the time and frequency domain dielectric response parameters. Firstly, oil-paper insulation samples with different moisture content were prepared, and the influence of moisture and temperature on the polarization and depolarization current (PDC) and frequency domain spectroscopy (FDS) curves was analyzed. Furthermore, the characteristic parameters of PDC and FDS curves under different damp conditions were extracted. On this basis, the grey correlation algorithm was used to integrate the time and frequency domain dielectric characteristic parameters of oil-paper insulation to obtain its standardized reference vector. Finally, the accuracy of evaluation model was verified by laboratory sample data and field transformer data, which provides a new method for warning and diagnosis of transformer early fault.

**Key words:** oil-paper insulation; time and frequency domain conversion; grey correlation; damp and temperature; fault diagnosis

## 0 引言

油纸绝缘变压器是电网中最重要的设备之一,其绝缘状态的快速、准确评估对于电力系统的安全稳定运行至关重要<sup>[1-3]</sup>。水分作为影响油纸绝缘运行状态重要的因素之一,被视作变压器绝缘系统的“头号威胁”<sup>[4-5]</sup>。但传统的含水量检测方法评估结

果难以量化,在外界因素影响下测量结果存在一定偏差且难以校正<sup>[6-7]</sup>。

近年来,以介电响应为理论基础的频域介电谱法(FDS)因具有测试电压低、接线简单、对设备绝缘无损等特点而备受国内外学者关注<sup>[8-10]</sup>。又因其携带信息丰富、抗干扰能力强等特点,更适宜现场检测,在油纸绝缘含水量评估方面具有很大潜力<sup>[11-12]</sup>。

为此,有学者开始尝试利用 FDS 数据进行机器

基金项目:宁夏自然科学基金资助项目(2021AAC03503)

学习以实现油纸绝缘含水量和老化状态的评估。范贤浩等<sup>[13]</sup>将全频段频域介电谱曲线作为训练数据,基于支持向量机(SVM)构建了油纸绝缘老化状态评估模型。A BETIE等<sup>[14]</sup>使用FDS曲线数据训练了一个含有44个输入层神经元、2个输出层神经元的监督式神经网络来评估油纸绝缘含水量。但SVM对于非线性问题往往无法找到合适的核函数,导致其评估性能较差<sup>[15-16]</sup>。神经网络可以用较少参数表示任意复杂函数,却存在网络结构复杂、学习速度慢等问题<sup>[14,17]</sup>。

同时,上述方法均使用全频段FDS曲线作为测试数据。由于低频段测试周期较长,完整的FDS测试流程通常耗费数个小时,较长的测试时间严重制约了现场检修的“时间窗口”安排。目前缩短FDS测试时间的主要方法为时频转换法,即在耗时较长的FDS低频段使用PDC进行测量,再通过扩展Debye电路等效法或Fourier变换法将PDC数据转化为FDS数据后进行绝缘状态评估。

研究表明,工况下受潮的油纸绝缘设备往往存在非线性特性<sup>[18]</sup>。ZHANG D N等<sup>[19]</sup>通过制备不同绝缘状态的样品,研究了不均匀受潮对油纸绝缘低频段非线性电导损耗特性的影响。邓映鑫等<sup>[20]</sup>研究发现受潮会导致油纸绝缘的非线性特性逐渐显现,响应电流中的谐波成分增大,影响频域介电谱测试结果。因此,受潮状态下油纸绝缘的等效扩展Debye模型不再具有线性的电阻、电容串并联回路;同样,Fourier变换方法也仅适用于线性响应系统,使得基于时频转换的油纸绝缘状态评估方法存在一定误差<sup>[20-21]</sup>。

为解决以上问题,综合利用时域与频域介电谱的优势,本文通过提取不同受潮状态下PDC以及FDS曲线的特征参数,采用灰色关联算法整合油纸绝缘时频域介电特征量得到其规范化后的参考向量,计算并对比关联度实现油纸绝缘含水量的精确评估。相比于其他算法,由于灰色关联算法对样本数量和规律敏感度较小,计算简单,不会出现量化结果与定性分析结果不符的情况,可作为评估油纸绝缘水分含量的智能算法。由此,可以在缩短FDS数据获取时间的基础上消除由于非线性特性引起的时频域转换误差,为油纸绝缘含水量的精确评估提供了一种新思路。

## 1 不同受潮程度样品的制备

为模拟油浸式设备常见的绝缘受潮情况,在实验室条件下制作了不同受潮类型的油纸绝缘样品,

以构建油纸绝缘受潮状态评估方法。考虑到绝缘纸的规格应大于测量电极直径,将其统一裁剪成长为60 cm、宽为60 cm的绝缘纸,如图1所示。

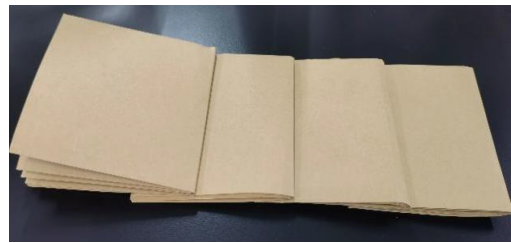


图1 绝缘纸样品

Fig.1 Insulation paper samples

绝缘纸的干燥步骤:首先清洁烘箱内部,用酒精擦拭烘箱内壁并调试烘箱温度使得烘箱内的水分除净。然后,将绝缘纸较为均匀地竖直放在干净的玻璃干燥罐中,将真空烘箱的温度设置为105℃,预抽真空干燥24 h,在干燥过程中绝缘纸中的水分会蒸发凝结在箱体的观察窗上,打开烘箱将其擦去。将绝缘纸继续在105℃并抽真空的环境下干燥48 h,此时可以认为干燥绝缘纸中含水量小于0.5%。

绝缘油的干燥步骤:在烘箱温度为105℃下对绝缘油真空干燥72 h,使干燥后的绝缘油中水分含量不超过5 mg/L。在制备干燥绝缘油和绝缘纸时,需要将其分别放在不同烘箱里面处理,这是由于干燥绝缘油的烘箱会残留绝缘油,若将绝缘纸放入其中进行干燥,会导致挥发的油蒸气吸附到绝缘纸上使得其中的水分无法挥发。这样不仅影响绝缘纸的干燥程度,也会影响制作不同含水量绝缘纸的精度。

不同含水量绝缘纸样品制作流程:将干燥后的绝缘纸取出放在高精度天平上进行称重并实时记录数据;通过绝缘纸的自然吸潮使其达到所需质量,然后将其放入干燥的绝缘油中在真空环境下浸渍48 h,令水分在绝缘纸和绝缘油中分布均衡。将制备好的油浸纸样品利用卡尔费休水分测定仪进行水分标定,制备出含水量分别为1.07%、2.05%、3.06%和4.08%的油纸绝缘样品。

## 2 油纸绝缘样品时频域介电响应特性

### 2.1 PDC基本原理

首先对样品外施一个电压幅值为 $U_0$ 的直流阶跃电压,持续时间为 $T_p$ ,在该过程中样品会产生极化现象,极化电流为 $i_{pol}$ 。在极化过程中,极化电流会逐渐变小,最后趋于稳定。极化电流由电导电流、

充电电流以及吸收电流 3 部分组成<sup>[22]</sup>, 可表示为式(1)。

$$i_{\text{pol}}(t) = C_0 U_0 \left( \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right) \quad (1)$$

式(1)中:  $C_0$  为电介质的几何电容;  $\sigma_0$  为电介质的直流电导率;  $\varepsilon_0$  为真空介电常数;  $\varepsilon_\infty$  为光频介电常数;  $t$  为测量时间;  $\delta(t)$  是持续时间极短、幅值极高的电流;  $f(t)$  为介电响应函数。

在电介质充电一段时间后, 将样品短接使其放电, 放电时间为  $T_d$ , 去极化电流为  $i_{\text{depol}}$ 。去极化电流主要是由瞬时位移极化和松弛极化所构成<sup>[23]</sup>, 根据叠加定理可以得到极化电流的表达式为式(2)。

$$i_{\text{depol}}(t) = -C_0 U_0 \left[ \varepsilon_\infty \delta(t) + \left\{ f(t) - f(t + T_p) \right\} \right] \quad (2)$$

## 2.2 FDS 基本原理

在时域中, 由电场强度  $E(t)$  产生的绝缘系统内总电流密度  $J(t)$  的阶跃响应为式(3)<sup>[24]</sup>。

$$J(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 \frac{dE(t)}{dt} + \varepsilon_0 \int_0^t f(t-\tau) E(\tau) d\tau \quad (3)$$

式(3)中:  $\sigma_0$  为直流电导率;  $\varepsilon_0$  为真空介电常数;  $\tau$  为松弛时间常数。

对式(3)进行拉普拉斯变换, 可得式(4)。

$$J^*(\omega) = \left[ \left\{ \sigma_0 + \varepsilon_0 \omega \chi''(\omega) \right\} + j\omega \varepsilon_0 \left\{ 1 + \chi'(\omega) \right\} \right] E^*(\omega) \quad (4)$$

式(4)中:  $\chi'(\omega)$  和  $\chi''(\omega)$  分别为复极化率的实部与虚部;  $\omega$  为角频率。

由式(4)可得复介电常数为式(5)。

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^*(\omega) &= \varepsilon_r'(\omega) - j\omega \varepsilon_r'' \\ &= \left[ 1 + \chi'(\omega) \right] - j \left[ \chi''(\omega) + \frac{\sigma_0}{\omega \varepsilon_0} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

因此, 频域上的介质损耗因数  $\tan \delta$  为式(6)。

$$\tan \delta = \frac{C''}{C'} = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{\chi''(\omega) + \frac{\sigma_0}{\omega \varepsilon_0}}{1 + \chi'(\omega)} \quad (6)$$

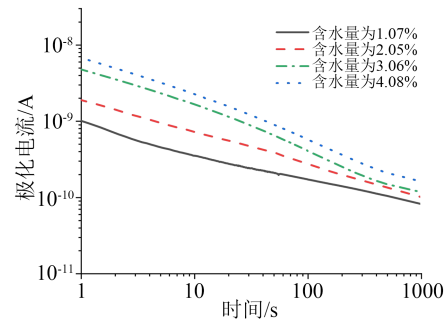
由电导和极化造成的损耗包含在  $C''$  中。同时, 复介电常数和  $\tan \delta$  都取决于频率。

## 2.3 PDC 曲线分析与参数提取

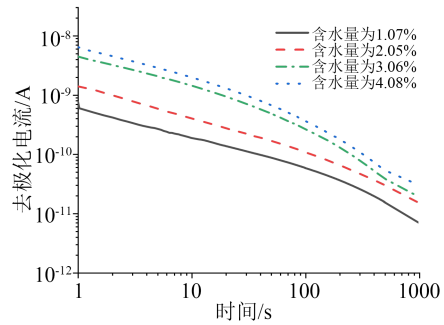
### 2.3.1 受潮程度对 PDC 曲线响应特性的影响

将含水量为 1.07%、2.05%、3.06% 和 4.08% 的油纸绝缘样品放置在烘箱中, 使用美国 Keithley 公司制造的 6517A 静电计进行 PDC 测试, 设置测试温度为 25℃, 测试电压为 600 V, 充放电时间均设置为 1 000 s, 不同含水量油纸绝缘样品的 PDC 测试结果如图 2 所示。

实际现场中的测试温度与实验室温度往往存在一定偏差, 使用 Arrhenius 公式计算样品的活化能可以实现不同温度间 PDC 测试曲线的相互转换<sup>[25]</sup>。



(a) 极化电流曲线



(b) 去极化电流曲线

图 2 不同含水量油纸绝缘样品的 PDC 曲线

Fig.2 PDC curves of oil-paper insulation samples with different moisture content

由图 2(a)可以看出, 随着水分含量的增加, 极化电流曲线呈现整体上升的趋势。这是由于水分的强极性使其易被绝缘纸吸收, 水分含量的增加会使得绝缘纸的绝缘电阻降低, 绝缘纸内部的极化强度增强。由图 2(b)可以看出, 水分含量的增加使得去极化电流的曲线也出现整体上升的趋势。水分的增加会使得自由电荷、离子在绝缘纸内部的迁移速度增加, 从而增大直流电导。由于去极化电流主要是由直流电导构成, 因此随着含水量的增加, 去极化电流整体增大。

### 2.3.2 PDC 曲线参数提取

从图 2 可以看出不同含水量样品的极化与去极化电流曲线与横坐标所围成的面积存在差异。含水量越高, 样品内部极化强度越高, 对应的电流幅值越大。因此, 本文将极化与去极化电流曲线的积分值作为时域介电谱表征油纸绝缘含水量的特征参量, 具体积分值如表 1 所示。由表 1 可知, 随着含水量的增加, PDC 极化电流与去极化电流曲线的积

表 1 PDC 曲线积分值

Tab.1 The integral value of PDC curves

| 项目       | 含水量/%                  |                        |                        |                        |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|          | 1.07                   | 2.05                   | 3.06                   | 4.08                   |
| 极化电流积分值  | $1.195 \times 10^{-7}$ | $1.914 \times 10^{-7}$ | $2.383 \times 10^{-7}$ | $3.325 \times 10^{-7}$ |
| 去极化电流积分值 | $2.796 \times 10^{-8}$ | $5.426 \times 10^{-8}$ | $1.225 \times 10^{-7}$ | $1.704 \times 10^{-7}$ |

分值逐渐增大,可以作为灰色关联状态参考向量的子集。

### 2.4 FDS曲线分析与参数提取

#### 2.4.1 受潮程度对FDS曲线响应特性的影响

针对含水量为1.07%、2.05%、3.06%和4.08%油纸绝缘样品,采用奥地利Omicron公司开发的DIRANA介电响应分析仪进行FDS测试。由于采用时频联合的测试方法,低频段使用PDC进行测试,故FDS测试频带范围为0.1 Hz~5 kHz。测试温度为25℃,电压峰值为200 V。研究表明,改变测试温度仅使得FDS曲线平移,可依据Arrhenius模型对不同温度下的FDS曲线进行归一化校正<sup>[24]</sup>。测试后使用卡尔费休水分测定仪进行水分含量的再次标定。不同含水量油纸绝缘样品的FDS特性曲线如图3所示。

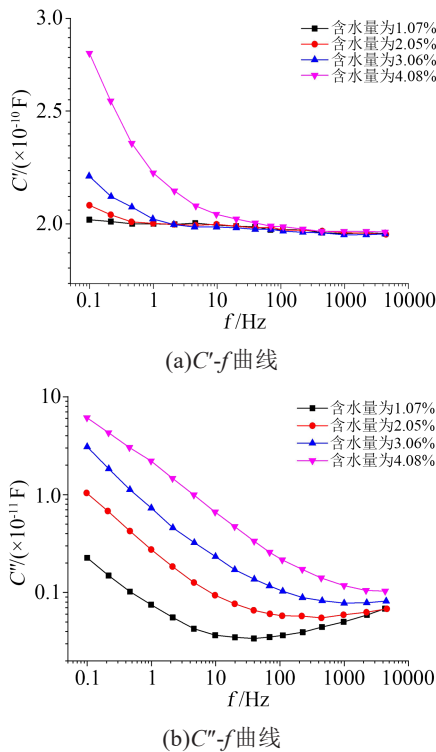


图3 不同含水量油纸绝缘样品的C\*-f曲线

Fig.3 The C\*-f-curves of oil-paper insulation samples with different moisture content

由图3(a)可知,随着含水量的增加,复电容实部C'-f曲线在高频段(100 Hz~5 kHz)整体保持一致,在中频段(0.1~100 Hz)呈增加趋势。

由图3(b)可知,随着含水量的增加,复电容虚部C''-f曲线整体呈增加的趋势,在整个频段内呈现“对勾”趋势。复电容虚部C''主要表征油纸绝缘的电导损耗与极化损耗过程,其中电导损耗主要反映在低频段,当频率足够低时,极化过程有充足的时间完

成,此时油纸绝缘介质内电导过程占据主导,其对应的低频段C''-f曲线为斜率为-1的直线。

#### 2.4.2 FDS曲线参数提取

从图3中可以看出,与PDC曲线类似,不同含水量样品的频域介电谱曲线与横坐标所围成的面积存在差异。因此,本文将复电容实部与虚部曲线的积分值作为频域介电谱表征油纸绝缘含水量的特征参量,具体参数如表2所示。由表2可知,随着含水量的增加,复电容实部与虚部曲线的积分值逐渐增大,与水分含量具有强相关性,可以用于构建灰色关联状态参考向量。

表2 复电容实部和虚部曲线的积分值

Tab.2 The integral value of real and imaginary parts of complex capacitance

| 项目    | 含水量/%                  |                        |                        |                        |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|       | 1.07                   | 2.05                   | 3.06                   | 4.08                   |
| 实部积分值 | $8.31 \times 10^{-9}$  | $8.33 \times 10^{-9}$  | $8.35 \times 10^{-9}$  | $8.38 \times 10^{-9}$  |
| 虚部积分值 | $2.44 \times 10^{-10}$ | $2.71 \times 10^{-10}$ | $3.56 \times 10^{-10}$ | $5.26 \times 10^{-10}$ |

## 3 基于灰色关联的油纸绝缘受潮状态评估模型

### 3.1 灰色关联基本原理

灰色关联分析法是灰色系统的重要组成部分,用于研究两个系统之间参数随时间或不同对象而变化的关联性大小,若两个参数变化的趋势具有一致性,说明二者关联程度较高。本文采用灰色关联算法研究油纸绝缘时频域参量与本文所提取特征参数的关联度,在缩短介电谱测试时间的基础上实现油纸绝缘含水量的准确评估。

#### (1)构建初始参考向量

设 $X_0=(x_0(1), x_0(2), x_0(3), x_0(4))$ 为系统的特征向量,其中 $x_0(1)$ 代表PDC极化电流曲线积分值; $x_0(2)$ 代表PDC去极化电流曲线积分值; $x_0(3)$ 代表复电容实部曲线积分值; $x_0(4)$ 代表复电容虚部曲线积分值。关联分析中被比较的向量记为 $X_1, X_2, \dots, X_m$ ,可表示为式(7)。

$$\begin{aligned}
 X_1 &= (x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(n)) \\
 X_2 &= (x_2(1), x_2(2), \dots, x_2(n)) \\
 &\dots\dots \\
 X_m &= (x_m(1), x_m(2), \dots, x_m(n))
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

#### (2)数据归一化

时域介电谱与频域介电谱表征油纸绝缘含水量的特征参数具有不同的量纲,为消除其对灰色关联模型结果的影响,构建归一化决策矩阵P,将实验值归一化至[0,1],如式(8)所示。

$$P = \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad (8)$$

依据式(8)对本文设定的4种油纸绝缘受潮状态的参考向量进行归一化,结果如表3所示。

表3 归一化后的参考向量

Tab.3 Normalized reference vector

| 含水量/% | 参考向量        | $x_0(1)$ | $x_0(2)$ | $x_0(3)$ | $x_0(4)$ |
|-------|-------------|----------|----------|----------|----------|
| 1.07  | $X_0^{(1)}$ | 1        | 0.232    | 0.067 6  | 0        |
| 2.05  | $X_0^{(2)}$ | 1        | 0.283    | 0.042 2  | 0        |
| 3.06  | $X_0^{(3)}$ | 1        | 0.513    | 0.033 6  | 0        |
| 4.08  | $X_0^{(4)}$ | 1        | 0.511    | 0.023 7  | 0        |

(3)灰色关联系数计算

为获得评估对象与最优解的关联性,需要计算参考向量与比较向量的灰色关联系数。将实际电力设备的实验值 $X_1, X_2, \dots, X_m$ 作为比较向量, $X_0$ 作为参考向量,灰色关联系数( $\zeta_i$ )的计算公式如式(9)所示。

$$\zeta_i = \sum_{k=1}^4 \frac{\min |x_0 - x_i| + \rho \cdot \max |x_0 - x_i|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max |x_0 - x_i|} / 4 \quad (9)$$

式(9)中,比较向量和参考向量都进行了归一化, $\rho$ 为定义在[0,1]的判断系数,一般取值为0.5<sup>[26]</sup>。最终,灰色关联系数为所有系数的平均值。

(4)综合评价

分别计算不同状态的参考向量与比较向量的灰色关联系数,选取最小关联系数所对应的状态作为油纸绝缘含水量的最终评估结果。

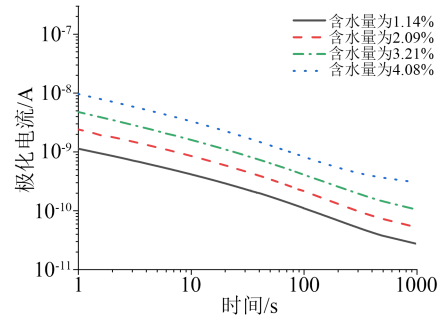
3.2 样品受潮程度检测

为验证评估模型的准确性,在第1节实验的基础上,再次制备不同受潮程度的油纸绝缘样品,其中样品的含水量分别为:样品1-1.14%,样品2-2.09%,样品3-3.21%,样品4-4.08%,测试条件与之前相同,其对应的PDC以及FDS曲线如图4和图5所示。

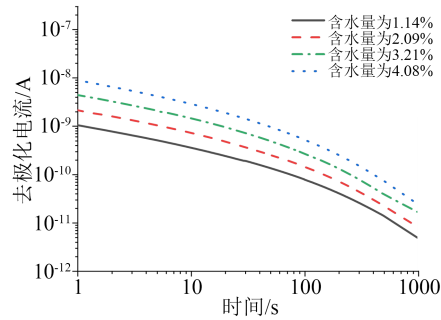
依据第2节内容,分别提取上述不同样品中表征油纸绝缘含水量的时域与频域介电谱特征参数作为灰色关联模型的比较向量,其归一化后的数值如表4所示。

依据公式(9)分别求取样品的比较向量与参考向量之间的关联度,结果如表5所示。

从表5可以看出,样品1~4的比较向量分别与参考向量 $X_0^{(1)}$ 、 $X_0^{(2)}$ 、 $X_0^{(3)}$ 和 $X_0^{(4)}$ 的关联度最大,说明样品1的含水量接近1.07%,样品2的含水量接近2.05%,样品3的含水量接近3.06%,样品4的含水量接近4.08%,模型的评估结果与样品的真实含水量基本相同,由此验证了本文所提油纸绝缘受潮状态



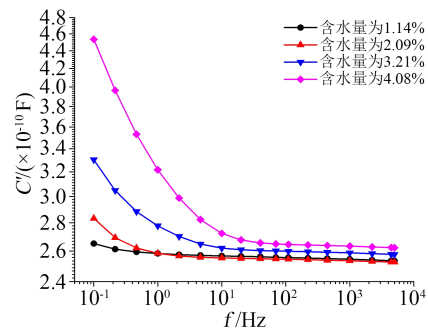
(a)极化电流曲线



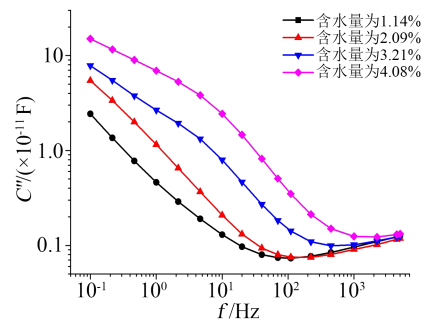
(b)去极化电流曲线

图4 不同受潮程度样品的PDC曲线

Fig.4 PDC curves of samples with different degrees of moisture



(a)C'-f曲线



(b)C''-f曲线

图5 不同受潮程度样品的C\*-f曲线

Fig.5 The C\*-f curves of samples with different degrees of moisture

评估方法的有效性。

3.3 现场变压器受潮程度检测

为进一步验证融合灰色关联和时-频域介电响

表4 油纸绝缘样品比较向量

Tab.4 The comparison vector of oil-paper insulation samples

| 样品  | 比较向量     |          |          |          |
|-----|----------|----------|----------|----------|
|     | $x_i(1)$ | $x_i(2)$ | $x_i(3)$ | $x_i(4)$ |
| 样品1 | 1        | 0.242    | 0.063 6  | 0        |
| 样品2 | 1        | 0.279    | 0.042 7  | 0        |
| 样品3 | 1        | 0.531    | 0.033 7  | 0        |
| 样品4 | 1        | 0.508    | 0.023 4  | 0        |

表5 样品与参考向量的关联度

Tab.5 Grey relational grade between sample and reference vector

| 含水量   | 参考向量        | 样品1   | 样品2   | 样品3   | 样品4   |
|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|
|       |             | 关联度   | 关联度   | 关联度   | 关联度   |
| 1.07% | $X_0^{(1)}$ | 0.991 | 0.939 | 0.832 | 0.837 |
| 2.05% | $X_0^{(2)}$ | 0.931 | 0.994 | 0.833 | 0.838 |
| 3.06% | $X_0^{(3)}$ | 0.829 | 0.838 | 0.989 | 0.984 |
| 4.08% | $X_0^{(4)}$ | 0.828 | 0.839 | 0.967 | 0.995 |

应参数的油纸绝缘受潮状态诊断方法在工况条件下的准确性,本文选取来自不同生产厂家和不同运行年限的3台油纸绝缘变压器(标记为 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ )分别进行时域PDC与频域FDS介电谱测试,测试温度的影响可以使用Arrhenius公式消除<sup>[24-25]</sup>。3台变压器的相关参数如表6所示。

表6 不同厂家变压器相关参数

Tab.6 The parameters of transformer from different companies

| 变压器   | 运行年限 | 工频介损/% | 电容量/pF |
|-------|------|--------|--------|
| $T_1$ | 6年   | 0.756  | 252    |
| $T_2$ | 13年  | 0.839  | 268    |
| $T_3$ | 15年  | 0.987  | 384    |

相比于全频段FDS测试(总时长51 min),使用时频联合的测试方法可以将测试时间缩短为23 min。实验过程中记录了相应的测试温度,并通过Arrhenius公式将实验曲线校正到25℃用于后续评估。依据第2节内容,分别提取3台变压器中表征油纸绝缘含水量的时域与频域介电谱特征参数作为灰色关联模型比较向量,如表7所示。

依据公式(9)分别求取 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 的比较向量与

表7 变压器比较向量

Tab.7 The comparison vector of transformers

| 比较向量       | $x_i(1)$ | $x_i(2)$ | $x_i(3)$ | $x_i(4)$ |
|------------|----------|----------|----------|----------|
| $X_1(T_1)$ | 1        | 0.288    | 0.042 8  | 0        |
| $X_2(T_2)$ | 1        | 0.486    | 0.021 4  | 0        |
| $X_3(T_3)$ | 1        | 0.497    | 0.022 4  | 0        |

参考向量之间的关联度,结果如表8所示。

表8 灰色关联度

Tab.8 Grey relational grade

| 含水量   | 参考向量        | $X_1$ 关联度 | $X_2$ 关联度 | $X_3$ 关联度 |
|-------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| 1.07% | $X_0^{(1)}$ | 0.927     | 0.835     | 0.833     |
| 2.05% | $X_0^{(2)}$ | 0.989     | 0.836     | 0.833     |
| 3.06% | $X_0^{(3)}$ | 0.831     | 0.946     | 0.962     |
| 4.08% | $X_0^{(4)}$ | 0.831     | 0.954     | 0.972     |

从表8可以看出, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 主绝缘的比较向量分别与参考向量 $X_0^{(2)}$ 、 $X_0^{(4)}$ 和 $X_0^{(4)}$ 的关联度最大,表明 $T_1$ 变压器主绝缘的含水量近似为2.05%, $T_2$ 和 $T_3$ 变压器主绝缘的含水量均近似为4.08%。从表6中3台变压器的运行参数可知,基于灰色关联和时频联合参数的油纸绝缘含水量评估模型结果具有一定的合理性和准确性。 $T_1$ 变压器的运行寿命、工频介损以及电容量均为3台变压器中的最小值,绝缘状况良好,含水量为2.05%较为合理; $T_2$ 和 $T_3$ 变压器的主绝缘均处于寿命中后期,含水量均为4.08%。为了进一步证实该结果的有效性,采用DIRANA数据库对水分进行评估,其结果为3.96%,两者的吻合度较高。说明 $T_2$ 与 $T_3$ 已处于受潮状态,后续需要进行滤油干燥,以保障其正常运行。由此验证了融合灰色关联与时频域介电响应的油纸绝缘受潮状态评估方法在工况条件下的可行性,在缩短介电谱测试时间的基础上消除了绝缘介质非线性特性引起的评估误差,具有较高的工程价值。

## 4 结论

本文探究了不同受潮程度油纸绝缘样品PDC以及FDS曲线特性,提出了基于灰色关联和时频域介电谱的油纸绝缘受潮状态评估模型,在缩短介电谱获取时间的基础上消除了绝缘介质非线性特性引起的评估误差,并通过对实验室样品和现场变压器进行绝缘状态诊断,验证了方法的有效性,主要结论如下:

(1)随着水分含量的增加,极化电流曲线和去极化电流曲线均呈现整体上升的趋势;水分含量的增加会使得绝缘纸的绝缘电阻降低,绝缘纸内部的极化强度增强;可以使用PDC曲线积分值作为表征油纸绝缘含水量的特征参量。

(2)随着含水量的增加, $C'-f$ 曲线在高频段(100 Hz~5 kHz)整体保持一致,在中频段(0.1~100 Hz)呈增加趋势, $C''-f$ 曲线在整个频段内呈现“对勾”趋势。可以使用复电容实部和复电容虚部的积分值表征油纸绝缘的受潮程度。

(3)通过评估4种不同受潮程度油纸绝缘样品以及3台不同绝缘状态变压器的含水量,进一步验证了本文所提融合灰色关联与时-频域介电响应的油纸绝缘受潮状态评估方法的有效性,为油纸绝缘电力设备受潮状态的快速精确诊断提供了解决方案。

### 参考文献:

- [1] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术,2016,40(4):985-991.
- [2] 梁兆杰,陈硕,田杰. 变压器绝缘纸材料的老化化学特性研究[J]. 绝缘材料,2021,54(8):52-59.
- [3] 郭金明,田树军,卓浩泽. 绝缘油老化特性及诊断方法研究进展[J]. 绝缘材料,2021,54(8):8-17.
- [4] YAO H, MU H, DING N, et al. Evaluation method for moisture content of oil-paper insulation based on segmented frequency domain spectroscopy: From curve fitting to machine learning[J]. IET Science, Measurement & Technology,2021,15(6):517-526.
- [5] ZHOU L, WANG D, CUI Y, et al. A method for diagnosing the state of insulation paper in traction transformer based on FDS test and CS-DQ algorithm[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification,2020,7(1):91-103.
- [6] 许渊,刘有为,王文焕,等. 大型电力变压器油纸绝缘含水量的介电响应诊断技术[J]. 中国电机工程学报,2012,32(33):133-140.
- [7] 穆海宝,赵浩翔,张大宁,等. 变压器油纸绝缘套管多参量智能感知技术研究[J]. 高电压技术,2020,46(6):1903-1912.
- [8] SAHA T K, YAO Z T. Experience with return voltage measurements for assessing insulation conditions in service-aged transformers[J]. IEEE Power & Energy Magazine,2002,18(1):128-135.
- [9] SAHA T K, PURKAIT P. Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2004,11(1):144-154.
- [10] SAHA T K, PURKAIT P. Investigation of an expert system for the condition assessment of transformer insulation based on dielectric response measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(3):1127-1134.
- [11] 吴广宁,夏国强,粟茂,等. 基于频域介电谱和补偿因子的油纸绝缘水分含量和老化程度评估方法[J]. 高电压技术,2019,45(3):691-700.
- [12] 贾海峰,刘骥,张明泽,等. 微水含量对老化后变压器油介电性能影响分析[J]. 哈尔滨理工大学学报,2020,25(6):70-76.
- [13] 范贤浩,刘捷丰,张懿议,等. 融合频域介电谱及支持向量机的变压器油浸纸绝缘老化状态评估[J]. 电工技术学报,2021,36(10):2161-2168.
- [14] BETIE A, MEGHNEFI F, FOFANA I, et al. Neural network approach to separate aging and moisture from the dielectric response of oil impregnated paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22(4): 2176-2184.
- [15] MA H, SAHA T K, EKANAYAKE C. Machine learning techniques for power transformer insulation diagnosis[C]//AUPEC 2011. Brisbane, Australia:IEEE,2011.
- [16] MA H, SAHA T K, EKANAYAKE C. Predictive learning and information fusion for condition assessment of power transformer [C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, USA:IEEE,2011:1-8.
- [17] 杨飞豹,高国强,宋臻杰,等. 基于频域介电谱和多输出支持向量回归的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 高压电器,2018,54(12):150-157.
- [18] KOCH M, FESER K. Reliability and influences on dielectric diagnostic methods to evaluate the ageing state of oil-paper insulations[J]. Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej. Konferencje, 2004, 40(15):95-101.
- [19] ZHANG D N, YUN H, ZHAN J Y, et al. Insulation condition diagnosis of oil-immersed paper insulation based on non-linear frequency-domain dielectric response[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(5):1980-1988.
- [20] 邓映鑫,杨丽君,燕飞东,等. 受潮油纸绝缘的非线性介电响应特性及HW模型在时-频转换中的应用[J]. 电工技术学报, 2020,35(21):4609-4619.
- [21] ASHKEZARI A D, MA H, SAHA T K, et al. Investigation of non-linearity in dielectric response measurements for transformer insulation diagnosis[C]//2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Perth, Australia:IEEE,2011:1-7.
- [22] SETAYESHMEHR A, FOFANA I, EICHLER C, et al. Dielectric spectroscopic measurements on transformer oil-paper insulation under controlled laboratory conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(4):1100-1111.
- [23] FOFANA I, HEMMATJOU H, FARZANEH M. Low temperature and moisture effects on polarization and depolarization currents of oil-paper insulation[J]. Electric Power Systems Research,2010,80(1):91-97.
- [24] CHAKRAVORTI S, DEY D, CHATTERJEE B. Recent trends in the condition monitoring of transformers[M]. London, UK: Power Systems Springer-Verlag,2013.
- [25] 马志钦,廖瑞金,郝建,等. 温度对油纸绝缘极化去极化电流的影响[J]. 电工技术学报,2014,29(4):290-297.
- [26] KAYACAN E, ULUTAS B, KAYNAK O. Grey system theory-based models in time series prediction[J]. Expert Systems with Applications,2010,37(2):1784-1789.

收稿日期:2022-01-13 修回日期:2022-03-09

作者简介:姚欢民(1998-),男(汉族),内蒙古包头人,博士生,主要从事电力设备状态监测及故障诊断技术的研究;通信作者:穆海宝(1982-),男(汉族),河北辛集人,教授,博士生导师,主要从事电力设备状态检测与评估技术、电气设备绝缘耐电性能提升技术以及微放电等离子体基础与应用技术的研究。