

# 基于弛豫电量的变压器油纸绝缘老化评估<sup>\*</sup>

贺德华<sup>1</sup>, 蔡金锭<sup>1</sup>, 蔡嘉<sup>2</sup>

(1. 福州大学电气工程与自动化学院 福州 350108; 2. 国网福建省电力有限公司物资分公司 福州 350003)

**摘要:** 回复电压法是一种研究电力变压器绝缘老化状态的无损检测方法。回复电压含有丰富的反映绝缘状态的介电弛豫响应信息, 为充分发挥回复电压法诊断油纸绝缘老化的优点, 提出了利用弛豫电量评估变压器绝缘老化状态的新方法, 并给出了相对弛豫电量与变压器油中糠醛含量的定量关系。首先, 对回复电压曲线进行微分解谱求解回复电压的弛豫响应函数; 其次, 利用弛豫电量与弛豫响应函数的关系, 计算出回复电压测量过程中的相对弛豫电量; 最后, 分析了相对弛豫电量与绝缘老化状态的关系。分析结果表明, 弛豫电量对变压器油纸绝缘的老化非常敏感, 相对弛豫电量  $Q_{1000}$  和  $Q_{500}$  与变压器油中糠醛含量存在较好的线性关系, 相对弛豫电量可用于变压器油纸绝缘老化的定量评估。

**关键词:** 回复电压; 弛豫响应; 时域微分解谱; 弛豫电荷; 绝缘诊断

中图分类号: TH183 TM411 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

## Aging evaluation of transformer oil-paper insulation based on quantity of relaxation charge

He Dehua<sup>1</sup>, Cai Jinding<sup>1</sup>, Cai Jia<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;  
2. Materials Branch, State Grid Fujian Electric Power Company Ltd., Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** Return voltage method is a nondestructive testing technique for studying the insulation aging state of power transformer. The return voltage contains abundant information about dielectric relaxation response reflecting the insulation aging status of transformer. In order to give full play to the advantages of return voltage method in diagnosing transformer oil paper insulation aging, a new method is proposed, which evaluates the insulation aging state of transformer using the quantity of relaxation charge. The quantitative relationship between the relative quantity of relaxation charge and the furfural content in the transformer oil is given. First of all, the return voltage curve is processed with the time-differential unfolding and the relaxation response function of the return voltage is solved. Secondly, the relative quantity of relaxation charge in the measurement process of return voltage is calculated using the relationship between the quantity of relaxation charge and the relaxation response function. Finally, the relationship between the relative quantity of relaxation charge and insulation aging state is analyzed. Analysis results show that the quantity of relaxation charge is very sensitive to the aging of transformer oil paper insulation. There is a good linear relationship between furfural content and the relative quantities of relaxation charge  $Q_{1000}$  and  $Q_{500}$ . The relative quantity of relaxation charge can be used for the quantitative evaluation of the aging of transformer oil paper insulation.

**Keywords:** return voltage; relaxation response; time-differential unfolding; relaxation charge; insulation diagnosis

## 1 引言

电力变压器是电力系统中的关键设备,其运行的

可靠性对整个电网的安全可靠运行具有十分重要的意义<sup>[1-3]</sup>。油纸绝缘系统是电力变压器中最主要的绝缘,对变压器的绝缘老化状态进行有效的评估,具有巨大的经济价值和社会意义<sup>[4-6]</sup>。近几年来,以电介质时域响应理论为基础的无损诊断方法受到国内外众多学者

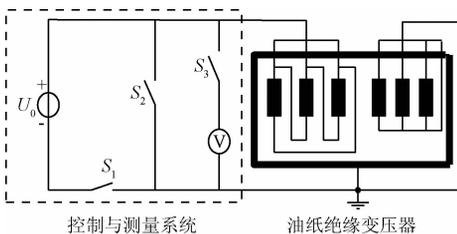
的关注<sup>[7-8]</sup>。由于极化电流值、去极化电流值都很小(10<sup>-9</sup> A数量级左右),极化去极化电流测量时很容易受到外部的电磁、噪声干扰,特别是在电气设备现场复杂的电磁环境,限制了极化去极化法<sup>[9-10]</sup>在现场检修工作中的推广应用。回复电压法由于其测量采集的信息丰富,抗干扰能力强,适合现场测试等优点而备受关注<sup>[11]</sup>。常用的方法主要是通过多次循环测量的得回复电压极化谱<sup>[12-13]</sup>,为了得到完整的有效回复电压极化谱测量耗时较长,需几小时至十几个小时不等,测量时间跨度大,不能保证测量时温度恒定,温度变化影响了诊断结果的准确性。同时,回复电压极化谱测试占用变压器的时间较长,不利于电力企业检修工作效率的提高。

截止到目前,国内外将介电响应法应用于变压器油纸绝缘领域的研究,大部分研究限于水分、温度以及老化等因素对介电响应参数的影响规律。针对应用介电响应法评估油纸绝缘老化状态存在的一些不足,本文提出一种新的诊断方法:利用变压器的回复电压曲线进行微分解谱分析,挖掘回复电压曲线的弛豫响应信息,并求取绝缘系统的相对弛豫电量,通过解析回复电压曲线的弛豫响应和弛豫电量信息,分析相对弛豫电量与绝缘老化存在的内在关系和规律,给出了相对弛豫电量与糠醛含量的定量关系,并通过实例验证了本文提出方法的合理性和有效性。

## 2 回复电压测量中的弛豫电量分析

### 2.1 回复电压的测量

回复电压测量法是一种建立在时域介质响应理论基础上的评估油纸绝缘老化状况的无损检测技术,回复电压蕴含丰富的能反映绝缘内部状态的介电弛豫响应信息。回复电压测量可分为充电、短路放电和回复电压测量3个阶段。图1(a)所示回复电压测试接线图,利用开关S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>和S<sub>3</sub>改变电源电压U<sub>0</sub>对绝缘系统的充电时间t<sub>c</sub>和放电时间t<sub>d</sub>,测量得到的回复电压U<sub>r</sub>(t)曲线如图1(b)所示。



(a) 回复电压测试接线图  
(a) Return voltage measurement circuit

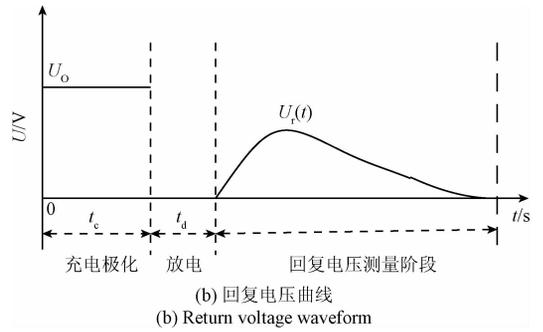


图1 回复电压测量电路及典型曲线

Fig.1 Return voltage measurement circuit and typical waveform

### 2.2 回复电压测量中弛豫电量分析

电介质材料在外电场E(t)的作用下,流过的电流密度j(t)为传导电流密度和位移电流密度之和<sup>[14]</sup>,电介质中的位移电流密度表示为:

$$j_r(t) = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{dE(t)}{dt} + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) E(\tau) d\tau \quad (1)$$

式中:ε<sub>0</sub>为相对介电常数,ε<sub>r</sub>相对介电常数,E(t)为介质中宏观平均电场强度,f(t)为介质弛豫响应函数。u(t)为电介质两端的电压,电场强度可以表示为E(t) = u(t) · C<sub>0</sub>/(ε<sub>0</sub>S),则电介质中的位移电流表示为:

$$i_r(t) = j_r(t) \cdot S = C_0 \epsilon_r \frac{d}{dt} u(t) + C_0 \frac{d}{dt} \int_0^t u(\tau) f(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

式中:S为介质的等效面积,C<sub>0</sub>为真空等效电容。定义回复电压测量阶段的定向迁移的电荷量为弛豫电量Q,弛豫电量Q与绝缘介质经充电放电后保存的剩余电荷量相等,则:

$$Q = \int_0^{t+t_d} i_r(t) dt = \int_0^{t+t_d} \left[ C_0 \epsilon_r \frac{d}{dt} u(t) + C_0 \frac{d}{dt} \int_0^t u(\tau) f(t-\tau) d\tau \right] dt \quad (3)$$

在回复电压测试过程中,从开始充电到短路放电阶段,电介质两端的电压从零增加到电压U<sub>0</sub>后再减为零,因此在充电和放电过程中,由电场强度变化引起的瞬时迁移电荷量为:

$$Q_\infty = C_0 \epsilon_r \int_0^{t+t_d} \left[ \frac{d}{dt} u(t) \right] dt = 0 \quad (4)$$

在进行充电放电后,电场强度变化引起的瞬时迁移电荷量为0,因此,回复电压测量过程中定向迁移的弛豫电量,即式(3)可以表示为:

$$Q = C_0 \int_0^{t+t_d} \left[ \frac{d}{dt} \int_0^t u(\tau) f(t-\tau) d\tau \right] dt \quad (5)$$

因为在充电阶段,电介质两端的电压为直流电压U<sub>0</sub>,

而在短路放电阶段,电介质两端的电压为零,因此式(5)可以整理表示为:

$$Q = C_0 U_0 \int_0^{t+t_d} \left[ \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) d\tau \right] dt \quad (6)$$

真空等效电容  $C_0$  与绝缘材料无关,只与绝缘几何结构有关且为常数,同一型号的变压器结构相同,  $C_0$  也基本相等。由于绝缘系统的真空等效电容  $C_0$  难以准确计算,为了便于同一规格的变压器的对比和评估,定义相对弛豫电量  $Q_0$  为:

$$Q_0 = \frac{Q}{C_0} = U_0 \int_0^{t+t_d} \left[ \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) d\tau \right] dt \quad (7)$$

求解绝缘电介质所包含的相对弛豫电量还需利用弛豫响应函数。

### 3 弛豫响应函数的求解

在回复电压测量阶段,绝缘介质各弛豫响应共同作用,绝缘电介质两端由剩余电荷形成一定规律的电势差<sup>[15]</sup>:

$$u_r(t) = \sum_{j=1}^n A_j e^{-t/\tau_j} \quad (8)$$

式中:  $A_j$  为第  $j$  个弛豫在总弛豫中的贡献,  $\tau_j$  为第  $j$  个弛豫响应的时间常数。利用不同时间常数的弛豫项对曲线末端贡献不同的原理,对回复电压曲线采用时域微分解谱法可求出各弛豫响应函数,且具有较高的准确性。

#### 3.1 回复电压时域微分解谱法的原理分析

对回复电压表达式(8)进行微分处理并乘以对应的时间  $t$ ,得到回复电压时域微分谱线函数为:

$$u_d(t) = -t \frac{du_r}{dt} = \sum_{j=1}^n A_j \cdot \frac{t}{\tau_j} \cdot e^{-t/\tau_j} = \sum_{j=1}^n \phi_j(t) \quad (9)$$

定义  $\phi_j(t)$  为时域微分子谱线,时域谱线是由多条子谱线叠加组成的曲线,子谱线与回复电压的弛豫项的数量相同。现以时间常数相差3倍的子谱线  $\phi_1(t) = 30te^{-t/3.33}$  和  $\phi_2(t) = 10te^{-t/10}$  为例进行对比分析,两条子谱线关系如图2所示。当在曲线末端  $t = 30$  时,  $\phi_1(30) = 0.73\% \phi_2(30)$ ,说明曲线  $\phi_1(t)$  末端对两子谱线之和的比重非常小,因此两子谱线叠加末端的值约等于

$\tau$  大的子谱线的值。同理当由多个子谱线叠加的谱线,谱线末端的值约等于  $\tau$  最大对应的子谱线的值。因此,可从回复电压时域微分谱线末端开始逐一分解求出各子谱线。

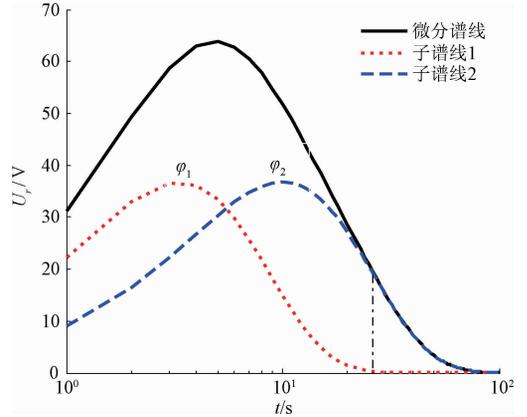


图2 子谱线对比示意图

Fig.2 Comparison of sub-spectrum lines

#### 3.2 回复电压曲线微分解谱法

根据微分解谱法原理分析,解谱过程的具体步骤如下:

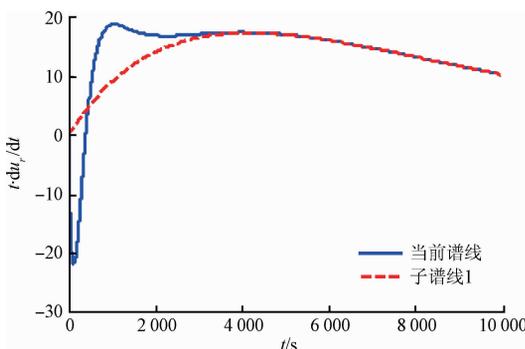
1) 将测试获取的回复电压曲线  $u_r(t)$  进行滤波消除干扰后,进行微分再乘以对应的时间  $t$ ,得到回复电压时域微分谱线  $u_d(t)$ 。

2) 由于  $\tau$  值小的子谱线在末端的对微分谱线贡献值非常小,可以忽略。可从回复电压时域微分谱线末端取两个点  $A(t_1, u_d(t_1))$ ,  $B(t_2, u_d(t_2))$ , 则:

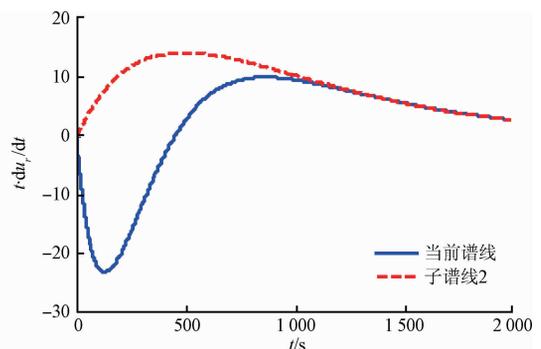
$$\begin{cases} u_d(t_1) - A_1 \cdot \frac{t_1}{\tau_1} \cdot e^{-t_1/\tau_1} \\ u_d(t_2) - A_1 \cdot \frac{t_2}{\tau_1} \cdot e^{-t_2/\tau_1} \end{cases} \quad (10)$$

求解方程即可求出回复电压时域微分谱线中时间常数  $\tau$  最大的子谱线  $u_{d1}(t)$  的参数  $A_1$  和  $\tau_1$ 。

3) 将回复电压微分谱线  $u_d(t)$  减去求出的第一条子谱线  $u_{d1}(t)$  得到剩余谱线,用剩余谱线代替回复电压时域微分谱线  $u_d(t)$ 。以变压器 T1 为例,其回复电压曲线微分解谱过程如图3所示。



(a) 分解第1条子谱线  
(a) Unfolding of the 1st sub-line



(b) 分解第2条子谱线  
(b) Unfolding of the 2st sub-line

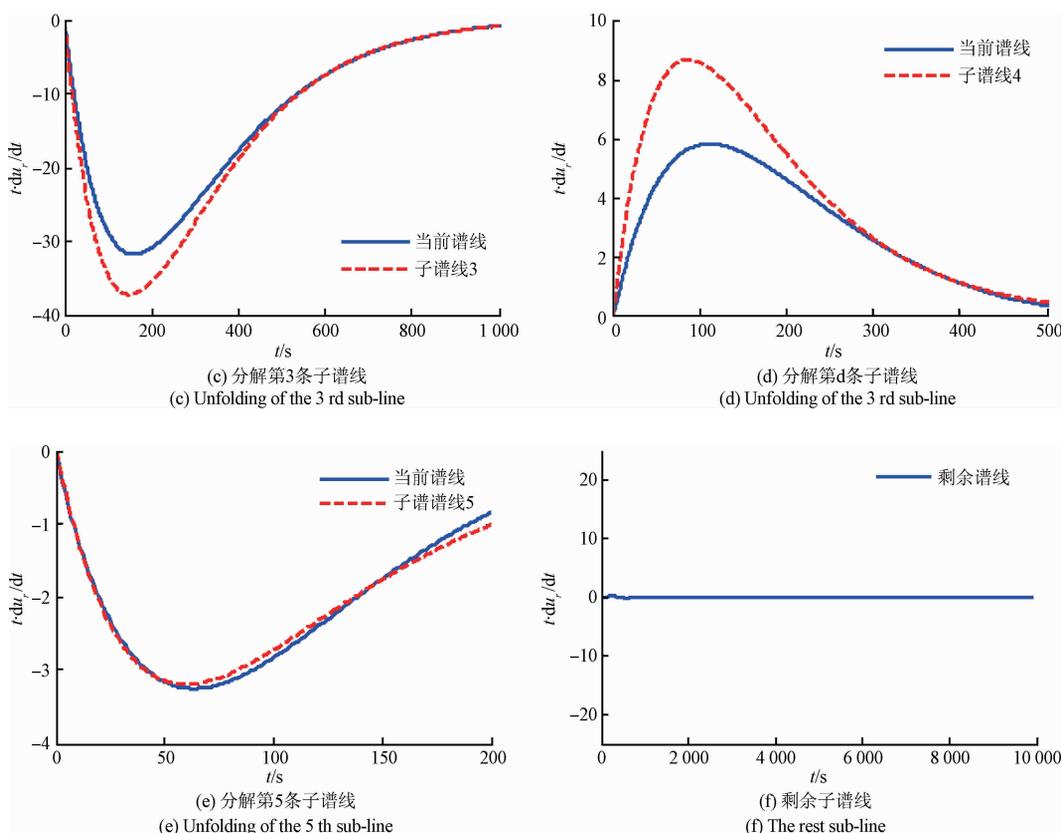


图3 微分解谱示意图

Fig. 3 Diagram of sub-spectrum lines unfolding

4) 若剩余谱线峰值小于设定的阈值时,则停止分解。否则重复步骤2)和3),即可依次解析出各子谱线。解谱过程中可以依次求解出与充放电时间对应的 $(A_1, \tau_1)$ ,  $(A_2, \tau_2), \dots, (A_n, \tau_n)$ , 介质弛豫响应函数 $f(t)$ 可用回复电压响应函数,即式(8)表示。

## 4 油纸绝缘的弛豫电量老化评估

### 4.1 相对弛豫电量与绝缘老化状态的关系

为了得到准确的弛豫响应函数,回复电压测量时间应尽量长,本文中测量时间超过10 000 s且电压衰减小于0.01 V才结束测量,可认为电压衰减完毕。测量时设置充电电压为2 000 V,充电与放电时间相等,定义充电时间1 000和500 s的相对弛豫电量分别为 $Q_{1\,000}$ 和 $Q_{500}$ 。

为了研究变弛豫电量与压器油纸绝缘老化状态之间的关系,现以型号为SFZ-31500/110和SFSE-240000/220的两组变压器为例,对诊断进行具体阐述。变压器的基本信息如表1和2所示。

表1 油纸绝缘变压器T1~T7信息

Table 1 The information of oil-paper insulation transformers T1~T7

变压器	运行年限	实际运行情况	
		糠醛含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	绝缘状态
T1	1	0.08	新投变压器
T2	5	0.18	绝缘良好
T3	12	0.53	轻微老化
T4	17	1.22	轻微老化
T5	3	2.63	绕组设计缺陷,需更换绕组
T6	21	5.21	严重老化
T7	20	7.34	严重老化,已退出运行

由于目前常用糠醛含量反映绝缘老化状态,油中糠醛含量越高,表征绝缘纸老化越严重。因此本文利用变压器油中糠醛含量作为反映绝缘老化状态的指标分析与弛豫电量的关系。分析发现,弛豫电量随着油中糠醛含

量增大而增加,油中的糠醛含量越高,其对应的值也就越大,弛豫电量  $Q(10^{-4})$  与糠醛含量  $x(\text{mg/L})$  存在近似线性关系。两组不同型号变压器的糠醛含量与相对弛豫电量的关系分别如图4和5所示。型号为SFZ-31500/110的变压器,充电放电时间为1000s时的相对弛豫电量  $Q_{1000}$  与糠醛含量拟合的定量关系为:

$$Q_{1000} = 0.85x + 1.04 \quad (9)$$

表2 油纸绝缘变压器T8~T13信息

Table 2 The information of oil-paper insulation transformers T8 ~ T13

实际运行情况			
变压器	运行年限	糠醛含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	绝缘状态
T8	2	0.11	绝艳良好
T9	7	0.28	绝缘良好
T10	14	0.83	轻微老化
T11	12	1.82	轻微老化
T12	19	4.32	严重老化
T13	24	8.26	严重老化,已退出运行

充电放电时间为500s时,相对弛豫电量  $Q_{500}$  与变压器的糠醛含量拟合的线性定量关系为:

$$Q_{500} = 0.57x + 0.42 \quad (10)$$

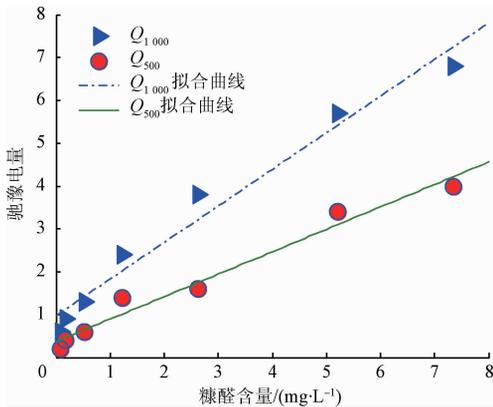


图4 相对弛豫电量与糠醛含量的关系

Fig. 4 The relationship between relative quantity of relaxation charge and furfural content

型号为SFSE-240000/220的变压器,充电放电时间为1000s时的相对弛豫电量  $Q_{1000}$  与糠醛含量拟合的定量关系为:

$$Q_{1000} = 1.12x + 1.25 \quad (11)$$

充电放电时间为500s时,相对弛豫电量  $Q_{500}$  与变压器的糠醛含量拟合的线性定量关系为:

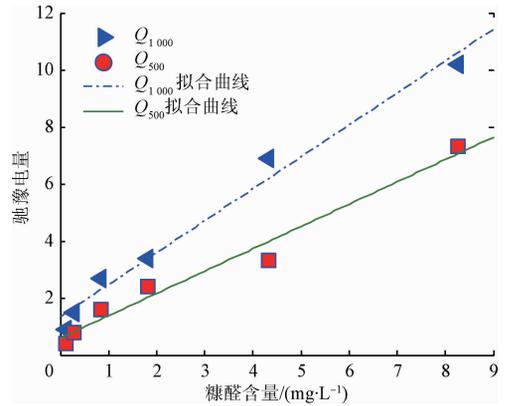


图5 相对弛豫电量与糠醛含量的关系

Fig. 5 The relationship between relative quantity of relaxation charge and furfural content

$$Q_{500} = 0.78x + 0.60 \quad (12)$$

由于变压器油中糠醛含量受到多种因素影响,如变压器装设的热虹吸过滤器会吸附部分糠醛,变压器检修过程中的虑油处理都会影响到糠醛含量的测量值。因此,分析结果与实际老化情况也存在一定的误差。

#### 4.2 绝缘老化对弛豫电量影响的机理分析

从图4和5可知,绝缘老化程度与弛豫电量成正相关关系。变压器油和绝缘纸的相对介电常数分别为2.2和4.5左右,而油纸绝缘老化过程中产生的水分、甲酸、糠醛以及各种醇类的相对介电常数远大于油和纸的介电常数。随着油纸绝缘老化程度的加深,老化产物的比例也随之增加,使绝缘系统整体的相对介电常数增加,绝缘系统的极化能力和储存电荷能力增强,在充电极化过程中,绝缘吸收的自由电荷增多。其次,随着绝缘老化程度的加深,绝缘系统中物质种类和比例发生改变,极化界面种类增多,界面极化在所有极化机制中的比例也增加,增强了绝缘系统束缚电荷的能力;此外,绝缘系统的界面极化和种类的增多,使介电弛豫慢效应显著,电荷受扩散作用制约<sup>[16]</sup>,从而使绝缘束缚自由电荷的能力增强,在短路放电过程中,电荷迁移速度减缓,保存不被释放的自由电荷增多。由于以上几种因素,随着绝缘老化程度的加深,油纸绝缘中的弛豫电量也越多。

#### 4.3 实验验证

为进一步验证本文提出方法的准确性和普遍性,现利用两台分别与表1和2相同型号的变压器进行验证。根据本文所提方法,分析回复电压并计算出相对弛豫电量,并对变压器的绝缘老化状态进行诊断,变压器的分析诊断结果如表3所示。

表3 油纸绝缘变压器 T14 ~ T15 的分析结果

Table 3 The diagnosis results of oil-paper insulation transformers T14 ~ T15

变压器	糠醛含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$Q_{1000}$ ( $\times 10^{-4}$ )	$Q_{500}$ ( $\times 10^{-4}$ )	诊断结果
T14	0.21	1.21	0.54	绝缘良好
T15	7.14	8.83	6.17	严重老化

变压器 T14 回复电压计算出相对弛豫电量值  $Q_{1000}$  和  $Q_{500}$  分别为 1.21 和 0.54, 评估糠醛含量分别为 0.19 和 0.24 mg/L, 绝缘状态良好。实际情况为变压器 T14 投运时间为 5 年, 检测油中糠醛含量为 0.21 mg/L。变压器 T15 相对弛豫电量值  $Q_{1000}$  和  $Q_{500}$  分别为 8.83 和 6.17, 评估糠醛含量分别为 7.35 和 7.14 mg/L, 绝缘老化严重。实际情况为该变压器投运时间为 21 年, 糠醛含量为 7.32 mg/L, 绝缘老化严重并已退出运行。

以上实例的诊断结果与实际情况都基本符合, 进一步验证了本文提出的利用弛豫电量评估绝缘老化状态的准确性和可靠性, 并可得出评估油纸绝缘老化状况的结论: 变压器油纸绝缘状况良好的弛豫电量较小, 油纸绝缘老化越严重, 弛豫电量越大。

## 5 结 论

从电介质弛豫理论分析出发, 提出了一种利用弛豫电量定量诊断评估变压器油纸绝缘老化的新方法, 通过实例验证了方法的可行性和准确性, 并可得出如下结论。

1) 利用回复电压曲线计算得到的弛豫电量可以用来对变压器进行准确评估, 变压器油中糠醛含量与相对弛豫电量成线性关系, 绝缘老化越严重, 弛豫电量也越多。

2) 新方法利用单条回复电压曲线进行诊断评估, 占用变压器的时间少、效率高且回复电压测量抗干扰能力强, 适合现场测试。由于变压器的现场测试环境温度不能人为控制, 温度对弛豫电量计算分析的影响还需进行后续研究。

3) 由于现场变压器的数据测量采集需要停电, 并得到供电企业的许可与配合, 试验数据的采集工作存在较大困难, 且各变电站的变压器规格型号也不尽相同, 同一型号的变压器的数据测量和收集尤为困难, 确定相对弛豫电量与绝缘老化定量关系的样本数量还需要增加, 以进一步提高拟合方程的准确度。

## 参考文献

[1] 邹阳, 蔡金锭. 油纸绝缘变压器时域极化谱特性实验分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 307-313.

ZOU Y, CAI J D. Experimental analysis on time-domain polarization spectrum of oil-paper insulation transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 307-313.

[2] 祝顺才, 蔡金锭. 改进仿射粒子群算法在电路参数估计的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12): 1958-1966.

ZHU SH C, CAI J D. Application of improved affine particle swarm optimization algorithm in parameter estimation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30(12): 1958-1966.

[3] 林土方, 洪凯星, 郭才福, 等. 基于 B/S 架构的变压器在线状态监测系统实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(8): 766-772.

LIN T F, HONG K X, GUO C F, et al. Implementation of on-line state monitoring system for transformer based on B/S architecture[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(8): 766-772.

[4] MITCHINSON P M, LEWIN P L, CHEN G C, et al. An experiment for evaluating the scale effect of moisture on high voltage transformer insulation[C]. Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2006: 218-221.

[5] 陈未根, 杜杰, 凌云, 等. 基于能量-小波矩特征分析的油纸绝缘气隙放电过程划分术[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1062-1069.

CHEN W G, DU J, LING Y, et al. Air-gap discharge process partition in oil-paper insulation based on energy-wavelet moment feature analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 1062-1069.

[6] 蔡金锭, 林智勇, 蔡嘉, 等. 基于等效电路参数的变压器油中糠醛含量判别法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 706-713.

CAI J D, LIN ZH Y, CAI J, et al. Study on the discrimination method of furfural content in transformer oil based on equivalent circuit parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(3): 706-713.

[7] ZHANG T, CAI J D. Application of voltage response method for condition assessment of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(12): 2674-2680.

[8] 王晓剑, 吴广宁, 李先浪, 等. 酸值对变压器油纸绝缘系统回复电压参数影响规律研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 133-139.

WANG X J, WU G N, LI X L, et al. Influence of acid value on recovery voltage parameters of transformer oil-paper insulation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 133-139.

[9] 李功新, 江修波, 蔡金锭, 等. 采用微分去极化电流

- 法解析变压器油纸绝缘的介质响应函数[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1930-1936.
- LI G X, JIANG X B, CAI J D, et al. Dielectric response function for transformer oil-paper insulation solved by the method of differential depolarization current [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1930-1936.
- [10] 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.
- MA ZH Q, LIAO R J, HAO J, et al. Influence of temperature on polarization and depolarization current of oil-paper insulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 290-297.
- [11] 林智勇, 蔡金锭. 油纸绝缘极化等效电路参数计算方法[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(8): 62-66.
- LIN ZH Y, CAI J D. Novel method to calculate polarized equivalent circuit of oil-paper insulation [J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(8): 62-66.
- [12] 张涛 蔡金锭. 油纸绝缘变压器介质响应电路参数辨识的研究[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(4): 35-39.
- ZHANG T, CAI J D. Research on parameters identification for dielectric response equivalent circuit of transformers with oil-paper insulation [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2010, 20(4): 35-39.
- [13] 廖瑞金, 孙会刚, 袁泉, 等. 采用回复电压法分析油纸绝缘老化特征量[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 136-142.
- LIAO R J, SUN H G, YUAN Q, et al. Analysis of oil-paper insulation aging characteristics using recovery voltage method [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 136-142.
- [14] 张涛. 基于回复电压特征量的变压器油纸绝缘状态诊断研究[D]. 福州:福州大学, 2010.
- ZHANG T. Research on diagnosis of oil-paper insulation condition in transformer based on return voltage characteristic quantities [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2010.

- [15] BIRLASEKARAN S, YU X ZH. Relaxation studies on power equipment [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(6): 1061-1077.
- [16] 李景德, 曹万强, 李向前, 等. 时域介电谱方法及其应用[J]. 物理学报, 1996, 45(7): 1225-1231.
- LI J D, CAO W Q, LI X Q, et al. Time domain dielectric spectroscopy method and its application [J]. Acta Physica Sinica, 1996, 45(7): 1225-1231.

## 作者简介



贺德华, 2010年于湘潭大学获得硕士学位, 现为福州大学博士研究生, 主要研究方向为电气设备绝缘老化诊断。

E-mail: 153367542@qq.com

**He Dehua** received his M. Sc. degree in 2010 from Xiangtan University. Now, he is a Ph. D student in Fuzhou University. His main research interest is insulation aging monitoring and fault diagnosis of electrical equipment.



蔡金锭, 1989年于湖南大学获得硕士学位, 2001年于西安交通大学获得博士学位, 现为福州大学教授、博士生导师, 主要研究方向为电力系统故障诊断的研究。

E-mail: 1282112940@qq.com

**Cai Jinding** received his M. Sc. degree in 1989 from Hunan University and Ph. D. degree in 2001 from Xi'an Jiaotong University. Now, he is a professor and doctoral supervisor in Fuzhou University. His main research interest is fault diagnosis of power system.



蔡嘉, 2014年于福州大学获得硕士学位, 现为国网福建省电力有限公司物资分公司职员, 主要研究方向为电气设备应用和管理。

E-mail: 304727268@qq.com

**Cai Jia** received his M. Sc. degree in 2014 from Fuzhou University. Now, he is a staff in Materials Branch, State Grid Fujian Provincial Electric Power Company Limited. His main research interest is electrical equipment application and management.