

酸值对变压器油纸绝缘系统回复电压参数影响规律研究

王晓剑¹, 吴广宁¹, 李先浪¹, 高波¹, 彭倩², 赵虎¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 为研究酸值对回复电压参数的影响规律, 制作一套变压器简化模型, 用 25# 变压器油和普通纤维素纸作为油纸复合绝缘, 进行老化实验。结果表明: 绝缘纸中酸值与老化时间呈线性函数关系, 变压器油中酸值与老化时间呈指数函数关系; 回复电压最大值随绝缘纸中酸值增加呈线性规律增大, 中心时间常数随绝缘纸中酸值增加呈指数规律减小, 初始斜率随绝缘纸中酸值增加呈指数规律增大。

关键词: 变压器; 回复电压法; 酸值; 聚合度; 回复电压最大值; 中心时间常数; 初始斜率; 模型; 绝缘
中图分类号: TM 855 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.022

0 引言

油浸式变压器是电力系统的核心设备, 油纸复合绝缘作为变压器的主绝缘系统, 长期处于电磁场、高温和氧气等环境下, 变压器的绝缘系统会受到不同程度的破坏^[1-4]。绝缘性故障是导致变压器发生事故的主要原因^[4]。因此, 准确掌握变压器的绝缘状态具有十分重要的意义。酸值是评价油纸绝缘老化与氧化程度的综合指标之一^[5]。变压器在出厂前, 需要经过多项试验, 其中包括变压器油和绝缘纸的各项试验^[6]。GB/T7595—2008 规定, 变压器投运前, 油中酸值不得超过 0.03 mgKOH/g, 运行中的变压器不得超过 0.1 mgKOH/g, 且需要每年检测一次。因此, 绝缘油中酸值的测定非常重要。油中酸值的测定主要采用化学测试法, 该方法虽然精度较高, 但是操作比较复杂^[5,7]。目前纸中酸值的测定仍然没有统一的标准^[5,8]。L. E. Lundgaard 等人通过研究指出, 绝缘纸和绝缘纸的老化都会产生酸。其中, 绝缘纸主要由纤维素材料构成, 其老化主要产生低分子酸, 绝缘油主要是由环烷基原油生产而得, 其老化主要产生高分子酸。同时指出, 绝缘纸比变压器油吸收酸的能力更强。一般而言, 纸中酸值可以达到油中酸值的十几倍甚至上百倍^[8-10]。酸与水分的性质相似, 纸中酸含量的增加会明显缩短变压器油纸绝缘的使用寿命^[9-10]。因此, 绝缘纸中酸值的测定就显得尤为重要。

回复电压法 RVM(Recovery Voltage Measurement) 是一种能够有效诊断变压器绝缘状态的无损检测方法^[1,11]。目前, 国内外学者主要集中于温度和微水含量对回复电压参数的影响, 并对此进行了大量的实验研究。文献[4]定性研究了水分对回复电压参数

的影响规律, 结果表明, 在相同充放电的情况下, 回复电压的 3 个参数均与水分含量呈二次函数关系。文献[12]定性研究了绝缘纸聚合度对回复电压参数的影响, 结果表明, 回复电压的 3 个参数均与绝缘纸聚合度呈线性函数关系。文献[13]定性研究了温度对回复电压参数的影响规律, 结果表明, 回复电压的 3 个参数随温度的变化呈现指数函数关系。油纸绝缘系统中的酸值对回复电压的参数影响规律的研究, 却鲜见报道。如果能够建立起回复电压参数与绝缘纸中酸值的映射关系, 那么就可以利用回复电压法去评估变压器油纸绝缘系统的绝缘状态。

本文研究了变压器油和绝缘纸在 130℃ 时的老化特性, 借鉴固体物中有机酸的提取方法和变压器油中酸值的测试方法^[7], 设计了绝缘纸中酸值测定的实验步骤。测试并分析了绝缘纸和变压器油中的酸值随老化时间的变化规律、绝缘纸的聚合度和酸值的关系。重点研究了绝缘纸中酸值对回复电压参数的影响规律。

1 回复电压法测试原理

回复电压法是利用绝缘材料在直流电场下的极化特性, 测量得到回复电压曲线和参数, 并通过所测的参数对油纸绝缘老化的总体状态做出诊断。目前公认的回电压参数包括回复电压最大值($U_{\max}$)、中心时间常数(t_{cdm})和初始斜率(S_i)。变压器绝缘状态不同, 所测参数的差别很大^[1,12]。回复电压法检测技术具有抗干扰能力强、灵敏度高和非破坏性等优点^[12]。回复电压测试系统的电路如图 1 所示。一个测量周期可分为如下 4 个阶段。

a. 充电阶段(极化阶段)。 S_1 接通, S_2 和 S_3 断开, 使待测变压器充电 t_c 时间。

b. 放电阶段(快速去极化阶段)。 S_2 接通, S_1 和 S_3 断开, 撤去外加的直流高电压, 同时将低压侧短路, 使绝缘系统放电 t_d 时间, 一般取 $t_d = t_c / 2$ 。

c. 测量阶段(慢速去极化阶段)。在放电 t_d 时间后, S_1 和 S_2 断开, S_3 闭合, 采集变压器高压侧和低压侧之间的电压, 直到回复电压达到最大值 $U_{\max}$ 后再衰减一段时间, 由此得到 $U_r=f(t)$ 关系曲线, 即为回复电压曲线(如图 2 所示)。

d. 松弛阶段。 S_2 接通, S_1 和 S_3 断开, 将低压侧接地, 消除绝缘系统的全部极化现象, 然后开始下一个测量周期。

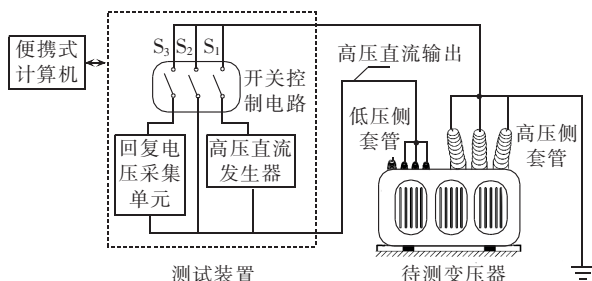


图 1 回复电压测试系统的原理图

Fig.1 Schematic diagram of recovery voltage test system

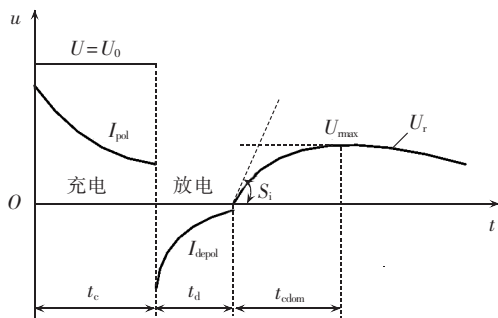


图 2 回复电压曲线

Fig.2 Curve of recovery voltage

根据广泛应用的油纸绝缘系统的扩展 Debye 等效电路模型(如图 3 所示), 分析了回复电压的产生机理。图中 C_g 表征油纸绝缘系统的真空几何电容, R_g 表征油纸绝缘系统的绝缘电阻, RC 串联支路表征油纸绝缘的松弛极化过程, 各支路的时间常数 τ_i ($\tau_i=R_iC_i$) 随 i 的增大而迅速减小。油纸的老化会导致串联支路电阻 R_i 的减小和电容 C_i 的增加, 而时间常数基本不变, 绝缘电阻 R_g 却会明显减小^[14]。在绝缘充电阶段, 电容 C_g 两端的电压瞬时达到电源电压 U_0 , 支路电容 C_i 积累电荷能力是由该支路的时间常数 τ_i 决定的。在放电阶段, 电容 C_g 的电荷瞬间完全释放, 放电完成后, 电容 C_i 的剩余电荷量是由该支路的时间常数 τ_i 决定的。在回复电压采集阶段, 高阻抗电压采集器两端的初始电压为 0(由于 C_g 内的电荷完全释放), 然后电压逐渐上升(由于支路电容 C_i 释放电荷), 达到最大值后, 又开始逐渐下降(由于绝缘电阻 R_g 和 R_i 不断消耗电荷)。

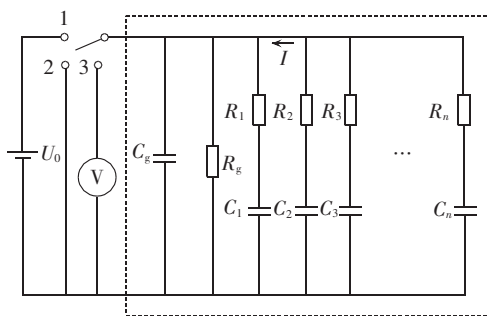


图 3 油纸绝缘的扩展 Debye 等效电路

Fig.3 Extended Debye equivalent circuit of oil-paper insulation

根据扩展 Debye 等效电路模型(图 3 所示)推导回复电压的一般表达式。设充电时间为 t_c , 放电时间为 t_d , 且 $t_c=2t_d$, 充电电压为 U_0 。

充电 t_c 时间后, 串联支路电容 C_i 两端的电压为:

$$U_{C_i}(t_c) = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t_c}{R_i C_i}} \right) \quad (1)$$

放电 t_d 时间后, 串联支路电容 C_i 两端的电压为:

$$U_{C_i}(t_d) = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t_c}{R_i C_i}} \right) e^{-\frac{t_d}{R_i C_i}} \quad (2)$$

由于在时域内, 对高阶动态电路的求解比较繁琐, 因此, 利用拉普拉斯变换转换到频域内求得频域解, 再利用拉普拉斯逆变换求得时域解。

为了便于理解, 先假设 Debye 等效电路中只有 1 条串联电路, 则在回复电压采集阶段, 由 KVL 和 KCL 可得:

$$U_r(s) = U_{C_i}(s) - R_i I(s) - \frac{I(s)}{s C_1} \quad (3)$$

$$\frac{U_r(s)}{R_g} + s C_g U_r(s) = I(s) \quad (4)$$

其中, $U_r(s)$ 、 $U_{C_i}(s)$ 、 $I(s)$ 分别是回复电压、电容 C_1 剩余电压和电流的拉普拉斯频域表示。

由式(3)和(4)得:

$$\frac{U_r(s)}{U_{C_i}(s)} = \frac{s C_1 R_g}{a s^2 + b s + 1} \quad (5)$$

$$a = R_g C_g R_1 C_1, \quad b = R_g C_g + R_1 C_1 + R_g C_1$$

进一步, 式(5)可表示为如下形式:

$$\frac{U_r(s)}{U_{C_i}(s)} = k \frac{s}{(s-p_1)(s-p_2)} \quad (6)$$

$$k = \frac{1}{R_1 C_g}$$

$$p_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a}}{2a}, \quad p_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4a}}{2a}$$

根据式(6), 由拉普拉斯逆变换可得:

$$U_r(t) = k (A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}) U_{C_i}(t_d) \quad (7)$$

$$A_1 = \frac{p_1}{p_1 - p_2}, \quad A_2 = \frac{p_2}{p_2 - p_1}$$

当 $t = \frac{\ln(p_2^2/p_1^2)}{p_1 - p_2} = t_{\text{cdom}}$ 时, 回复电压出现最大值, 其值为:

$$U_{\text{max}} = U_{C_1}(t_d) \frac{1}{R_1 C_g} \frac{1}{p_1 - p_2} (p_1 e^{p_1 t_{\text{cdom}}} - p_2 e^{p_2 t_{\text{cdom}}}) \quad (8)$$

$$U_{C_1}(t_d) = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t_d}{R_1 C_1}} \right) e^{-\frac{t_d}{2R_1 C_1}}$$

由式(8)可知, 回复电压最大值 U_{max} 与充电电压 U_0 、油纸绝缘的绝缘状态(可用 R_g 、 R_1 和 C_1 表征)和绝缘结构(可用 C_g 表征)、充电时间 t_c 和放电时间 t_d 有关。

若扩展 Debye 等效电路中含有 2 条串联电路, 则可得:

$$\frac{U_r(s)}{U_{C_i}(s)} = \frac{N_{2,i} s^2 + N_{1,i} s}{D_3 s^3 + D_2 s^2 + D_1 s + D_0} \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

$$D_3 = R_g C_g R_1 C_1 R_2 C_2$$

$$D_2 = R_g C_g R_2 C_2 + R_1 C_1 (R_2 C_2 + R_g C_g + R_g C_2) + R_g C_1 R_2 C_2$$

$$D_1 = R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_g C_g + R_g C_2 + R_g C_1$$

$$D_0 = 1$$

$$N_{2,1} = C_1 R_g R_2 C_2, \quad N_{1,1} = C_1 R_g$$

$$N_{2,2} = C_2 R_g R_1 C_1, \quad N_{1,2} = C_2 R_g$$

其中, $U_{C_i}(s)$ 是第 i 条串联支路电容 C_i 剩余电压的拉普拉斯频域表示。

由式(9)可得回复电压的表达式为:

$$U_r(t) = \hat{A}_1(t) U_{C_1}(t_d) + \hat{A}_2(t) U_{C_2}(t_d) \quad (10)$$

$$\hat{A}_i(t) = A_{i,1} e^{p_1 t} + A_{i,2} e^{p_2 t} + A_{i,3} e^{p_3 t}$$

$$A_{i,1} = k_i \frac{(p_1 - z_{i,1})(p_1 - z_{i,2})}{p_1(p_1 - p_2)(p_1 - p_3)}$$

$$A_{i,2} = k_i \frac{(p_2 - z_{i,1})(p_2 - z_{i,2})}{p_2(p_2 - p_1)(p_2 - p_3)} \quad (11)$$

$$A_{i,3} = k_i \frac{(p_3 - z_{i,1})(p_3 - z_{i,2})}{p_3(p_3 - p_2)(p_3 - p_1)}$$

$$k_i = \frac{N_{2,i}}{D_3}$$

进一步, 回复电压的最大值为:

$$U_{\text{max}} = U_0 \hat{A}_1(t_{\text{cdom}}) \left(1 - e^{-\frac{t_d}{R_1 C_1}} \right) e^{-\frac{t_d}{2R_1 C_1}} + U_0 \hat{A}_2(t_{\text{cdom}}) \left(1 - e^{-\frac{t_d}{R_2 C_2}} \right) e^{-\frac{t_d}{2R_2 C_2}} \quad (12)$$

若扩展 Debye 等效电路中含有 n 条串联电路, 则可得:

$$\frac{U_r(s)}{U_{C_i}(s)} = \frac{N_{n,i} s^n + N_{n-1,i} s^{n-1} + \cdots + N_{1,i} s}{D_{n+1} s^{n+1} + D_n s^n + \cdots + D_1 s + D_0} \quad (13)$$

由式(13)可得回复电压的表达式为:

$$U_r(t) = \hat{A}_1(t) U_{C_1}(t_d) + \hat{A}_2(t) U_{C_2}(t_d) + \cdots + \hat{A}_n(t) U_{C_n}(t_d) \quad (14)$$

进一步, 得到回复电压的最大值为:

$$U_{\text{max}} = U_0 \hat{A}_1(t_{\text{cdom}}) \left(1 - e^{-\frac{t_d}{R_1 C_1}} \right) e^{-\frac{t_d}{2R_1 C_1}} + \cdots +$$

$$U_0 \hat{A}_n(t_{\text{cdom}}) \left(1 - e^{-\frac{t_d}{R_n C_n}} \right) e^{-\frac{t_d}{2R_n C_n}} \quad (15)$$

$$\hat{A}_i(t_{\text{cdom}}) = A_{i,1} e^{p_1 t_{\text{cdom}}} + \cdots + A_{i,n+1} e^{p_{n+1} t_{\text{cdom}}}$$

$$A_{i,j} = k_i \frac{\prod_l (p_j - z_{i,l})}{\prod_{k \neq j} (p_j - p_k)}$$

$$k_i = \frac{N_{n,i}}{D_{n+1}}$$

其中, $j, k = 1, \cdots, n+1; i, l = 1, \cdots, n$ 。

由以上推导过程可知, 式(14)即为回复电压的一般解析表达式。

2 实验

2.1 样品准备

绝缘纸: 0.3 mm 普通纤维素绝缘纸。

变压器油: 25 # 环烷基变压器油。

2.2 老化实验

老化实验的步骤如下。

a. 制作若干大小为 180 mm × 10 mm 的绝缘纸片, 质量为 50 g, 将纸片卷成圆柱形后, 置于真空干燥箱中, 在温度为 40 ℃、真空度为 50 Pa 的条件下干燥 72 h, 去除纸中的水分。

b. 干燥完毕后, 保持真空度不变, 将真空箱中的温度设置为 25 ℃, 将干燥后的纸片卷浸入变压器油中, 然后置于真空箱中, 浸渍 48 h。

c. 准备 2 个 500 ml 的圆底烧瓶(编号分别为 1 号、2 号), 每个烧瓶中装有 300 ml 变压器油和 10 个卷成卷的绝缘纸片, 不完全密封, 放入鼓风干燥箱中(型号 101-1A), 在 130 ℃ 条件下进行加速老化试验。

d. 在 0 h、96 h、960 h、2400 h 和 4800 h 共 5 个时间点测量 1 号油纸绝缘样品的绝缘纸聚合度、绝缘纸和变压器油中的酸值; 与此同时, 对 2 号油纸绝缘样品进行回复电压测试。

2.3 酸值的测量方法

(1) 变压器油中酸值的测量方法。

本实验严格按照 GB/T264 规定的测量方法, 对不同老化程度的变压器油酸值进行测定。对每一油样, 均进行 3 次酸值测量, 取 3 次测试结果的平均值作为油样的最终酸值。

(2) 绝缘纸中酸值的测量方法。

目前, 国内外尚无制定统一的标准用于测定绝缘纸中的酸值。本文借鉴 GB/T264 和 L. E. Lundgaard 等人的研究成果, 设计了绝缘纸中酸值测试方法。具体测试步骤如下。

a. 分别取一块(50 g)不同老化时期的绝缘纸样品, 用尖镊子和刀片把它撕裂成细小的条状物。

b. 采用索氏提取器(抽取原理及其操作步骤见文献[14]),用 30 ml 丙二醇作为有机溶剂抽提绝缘纸试样。抽提完毕后,将丙二醇-有机酸混合液配制成 50 ml。丙二醇可以与甲酸等多种有机酸混溶。

c. 配制 0.05 mol/L 的 KOH 无水乙醇溶液。用高精度电子天平(型号 ESJ210-4A)称取 3 g KOH 固体试剂(理论值 2.8 g,考虑到 KOH 具有较强的吸湿性,实际称取值稍大于理论值),加适量无水乙醇,使其溶解,而后装入 1000 ml 容量瓶中,并用无水乙醇稀释至刻度线,摇匀即可。

d. 用浓度为 0.1 mol/L 邻苯二甲酸标定配制好的 KOH 无水乙醇溶液。经过标定,本次实验所配制的 KOH 无水乙醇溶液的浓度为 0.051 mol/L。

e. 配制溴百里香草酚蓝(BTB)指示剂。取 0.5 g 溴百里香草酚蓝(标准至 0.01 g)放入烧杯中,加入 100 ml 无水乙醇,然后用 0.1 mol/L KOH 的溶液中和至 pH 为 5.0。该指示剂的变色范围 pH 为 8.6~9.6,其颜色由黄变为蓝绿。

f. 测试绝缘纸样品的酸值。用锥形烧瓶称取 50 ml 步骤 b 中得到的丙二醇-有机酸混合液,于水浴上加热 5 min,取下锥形烧瓶加入 0.2 ml BTB 指示剂,趁热以 0.051 mol/L 的 KOH 乙醇溶液滴定,至溶液由黄色变成蓝绿色为止,记下消耗的 KOH 乙醇溶液的体积。试纸酸值的计算公式如下:

$$X=\frac{(V_1-V_0)\times 56\times c}{m}$$

其中, X 为试纸的酸值(mgKOH/g); V_1 为滴定丙二醇-有机酸混合液所消耗 KOH 无水乙醇溶液的体积(ml); V_0 为滴定空白所消耗 KOH 无水乙醇溶液的体积(ml); c 为 KOH 无水乙醇溶液的浓度(mol/L);56 为 KOH 的分子量; m 为试纸的质量(g)。

2.4 回复电压的测量

在测试酸值的同时,从 2 号圆底烧瓶中取出 30 ml 变压器油和一块绝缘纸片(50 g),将其放入直径为 200 mm、高度为 150 mm 的圆柱形容器,外壳采用硬树脂材料进行密封。回复电压的测量采用西南交通大学和国网四川省电力公司电力科学研究院联合研制的 RVM 变压器绝缘测试系统进行测量。由于充电电压和充放电时间之比都会影响到回复电压参数的测量结果。根据以往的研究成果,本次实验选取充电电压为 100 V,充放电时间之比 $t_c/t_d=2$ 。

3 油纸绝缘老化实验结果分析

3.1 酸值与老化时间的关系

电介质材料在长期处于高温、高电压和有氧的环境条件中,内部的分子链断裂,被氧化成酸。几种主要酸的类型及其性质见表 1。电离常数越小,说明该

酸电离 H^+ 的能力越强。从分子量来看,可把甲酸、乙酸和乙酰丙酸归为低分子酸,环烷酸和硬脂酸归为高分子酸^[9]。通过实验测量,得到油纸绝缘系统加速热老化形成酸值随老化时间的变化曲线如图 4 和图 5 所示。酸值与老化时间的拟合方程及拟合优度见表 2。

表 1 酸的类型及其性质
Tab.1 Type and properties of acid

酸值类型	分子量/ (g·mol ⁻¹)	电离常数 负对数	沸点/°C
甲酸	46	3.8	101
乙酸	60	4.8	118
乙酰丙酸	116	4.6	243
环烷酸	240	5.5	—
硬脂酸	285	10.5	232

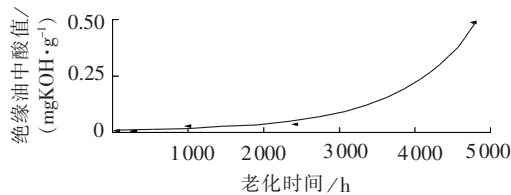


图 4 绝缘油中酸值和老化时间的关系曲线
Fig.4 Relationship between acid value of insulating oil and aging time

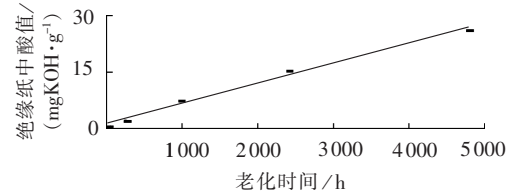


图 5 绝缘纸中酸值和老化时间的关系曲线
Fig.5 Relationship between acid value of insulating paper and aging time

表 2 酸值与老化时间的拟合方程与优度
Tab.2 Fitting equation of acid value and aging time, and fitting superiority

酸类型	拟合方程	拟合优度
油中酸值	$y=0.0045e^{0.00097t}$	0.988 2
纸中酸值	$y=0.005284t+1.282$	0.976 6

从图 4 可以看出,变压器油在老化过程中,有一个增速变化的拐点。在加速老化初期(0~2000 h),变压器油中的酸值随着老化时间缓慢增加,并且含量较低,但是在老化中后期(2000 h 之后),变压器油中的酸值随老化时间呈指数规律增加。这可能是由于:环烷基变压器油的主要成分是链烃($C_{12}H_{26}$)和环烷烃,质量分数约为 88.6%,其中,链烃与环烷烃分别占 11.6% 与 77.0%^[16]。环烷烃中又以二环烷烃和三环烷烃的质量分数最多,约为 70%^[17]。在老化初期,链烃分子裂解出一些小分子基团,但是含量较少。环烷烃的环张力较小,结构较链式结构稳定。其次,环烷烃分子需要先断裂成长链式结构,再裂解成小分子基团,才可能被氧化成酸,这个过程需要较长时间。因

此,在老化初期,油中的酸值较小。在老化中后期,即时间约为 2000 h(拐点处)时,在高温环境下,老化前期积累的大量长链式分子和小分子基团的化学键断裂,被氧化成酸,导致油中酸值迅速增加。因此,在老化中后期,油中酸值随老化时间呈指数函数增加。

从图 5 可以看出,绝缘纸中的酸值随着老化时间的增加呈线性增加。这主要是因为温度在纤维素分子的裂解过程中起着关键性的作用^[16,19]。纤维素是由 β -D-吡喃葡萄糖通过 1,4-糖苷键联结成的线性高分子化合物^[20]。温度越高,纤维素体系的分子总能量(包括动能和势能)越大,分子内部的波动越大,分子链就越容易断裂^[19-21]。分子的化学键断裂,形成一些小分子基团,在 130 ℃ 时,主要生成含有羟基的小分子产物^[19]。羟基在高温和有氧的环境中,易被氧化成羧基,进而形成几种主要类型的酸。因此,随着时间的增加,绝缘纸中酸值呈线性函数增加。

3.2 绝缘纸中酸值与聚合度的关系

聚合度是目前公认的可以反映绝缘纸老化程度的重要指标。绝缘纸的老化会产生水分和酸,同时水分和酸的产生又会加速绝缘纸的老化^[15]。绝缘纸中酸值和聚合度的关系如图 6 所示,拟合方程为 $y=925.3x^{-0.2661}$,拟合优度为 $R^2=0.9509$ 。从图中可以看出,绝缘纸的聚合度随着纸中酸值的增加呈幂函数规律降低。

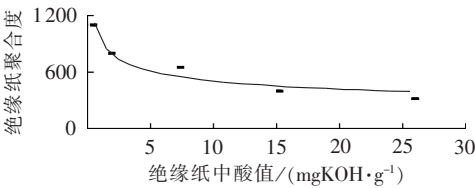


图 6 绝缘纸中酸值和聚合度的关系曲线
Fig.6 Relationship between acid value and DP of insulating paper

4 回复电压参数与纸中酸值测试结果分析

4.1 绝缘纸酸值与回复电压最大值 $U_{\max}$ 的关系

不同充电时间下,绝缘纸中酸值与回复电压最大值 $U_{\max}$ 的关系如图 7 所示,两者的拟合方程见表 3。

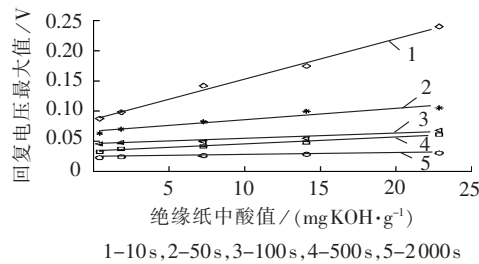


图 7 绝缘纸中酸值和回复电压最大值的关系
Fig.7 Relationship between acid value of insulating paper and maximum recovery voltage

表 3 酸值与回复电压最大值的拟合方程
Tab.3 Fitting equation of acid value and maximum recovery voltage

充电时间/s	拟合方程	拟合优度
10	$y=0.006122x+0.09878$	0.9942
50	$y=0.001776x+0.0808$	0.9358
100	$y=0.0008386x+0.06076$	0.9301
500	$y=0.001086x+0.05025$	0.9834
2000	$y=0.0003063x+0.04134$	0.9806

从图中可以看出,充电时间相同时, $U_{\max}$ 随纸中酸值的增加而增大,不同充电时间下,酸对 $U_{\max}$ 的影响关系相似。这主要是因为酸分子是极性分子,油纸绝缘系统老化越严重,纸中有机酸分子越多,单位体积内所含的极性粒子数越多,油纸绝缘系统的极化能力越强,宏观表征为介电常数 ϵ_r 增大,如图 8 所示。 ϵ_r 越大,扩展 Debye 等效电路中支路电容 C_i 呈增大趋势,绝缘系统积累电荷的能力也就越强,同等测试条件下,产生的回复电压也就越大。

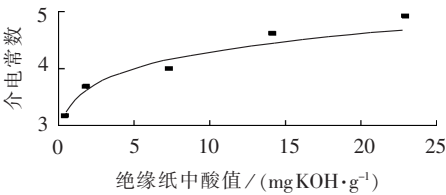


图 8 绝缘纸中酸值和介电常数的关系
Fig.8 Relationship between acid value of insulating paper and dielectric constant

4.2 绝缘纸酸值与中心时间常数 t_{cdom} 的关系

不同充电时间下,绝缘纸中酸值与中心时间常数 t_{cdom} 的关系如图 9 所示,两者的拟合方程见表 4。从图中可以看出,充电时间相同时, t_{cdom} 随纸中酸值的增加呈指数规律减小。油纸绝缘中酸分子数越多,导电离子数越多,尤其是 H^+ 明显增加,绝缘电导率增加,

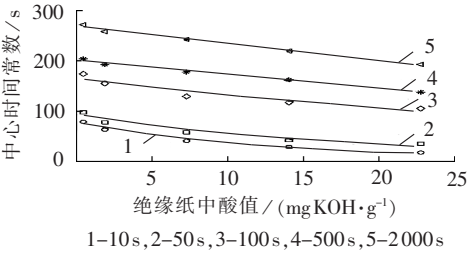


图 9 绝缘纸中酸值和中心时间常数的关系
Fig.9 Relationship between acid value of insulating paper and center time constant

表 4 酸值与中心时间常数的拟合方程
Tab.4 Fitting equation of acid value and center time constant

充电时间/s	拟合方程	拟合优度
10	$y=76.91e^{-0.07266x}$	0.9726
50	$y=91.79e^{-0.08076x}$	0.9414
100	$y=164.6e^{-0.02262x}$	0.9093
500	$y=201.3e^{-0.01662x}$	0.9876
2000	$y=268.0e^{-0.01464x}$	0.9908

导致绝缘电阻 R_g 减小,如图 10 所示。由于串联支路的时间常数基本不变,因此在回复电压采集阶段, R_g 的减小加快了电荷的消失, t_{cdom} 就越小。

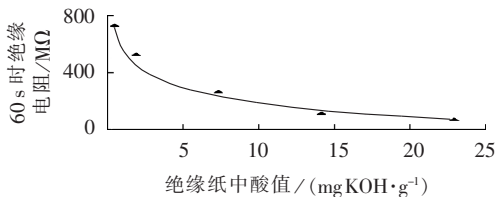


图 10 绝缘纸中酸值和绝缘电阻的关系
Fig.10 Relationship between acid value of insulating paper and insulation resistance

4.3 绝缘纸酸值与初始斜率 S_i 的关系

绝缘纸中酸值与初始斜率的关系如图 11 所示, 两者的拟合方程见表 5。从图中可以看出, 充电时间相同时, 初始斜率随着绝缘纸中酸值的增加呈指数规律增加, 尤其是充电时间较小时 (10 s、50 s), 这种增长速率更明显。主要是由于酸分子越多, 油纸绝缘系统的初始内场强越强, 时间常数较小的支路迅速放电 (去极化过程), 导致初始斜率 S_i 越大。因此, 进行回复电压测量时, 充电时间不宜太小, 以防止去极化过程不完全, 时间常数较小的支路反复快速放电和充电, 可能导致回复电压出现无序跳变, 影响测试结果。

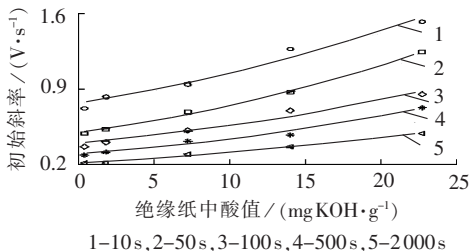


图 11 绝缘纸中酸值和初始斜率的关系
Fig.11 Relationship between acid value of insulating paper and initial slope

表 5 酸值与初始斜率的拟合方程

充电时间 / s	拟合方程	拟合优度
10	$y=0.7623e^{0.03124x}$	0.9726
50	$y=0.4951e^{0.04027x}$	0.9946
100	$y=0.3944e^{0.03491x}$	0.9709
500	$y=0.2931e^{0.03941x}$	0.9835
2000	$y=0.2193e^{0.03567x}$	0.9895

5 现场应用

课题组用回复电压测试装置对 2 台不同运行年限的变压器进行绝缘测试。2 台油浸式变压器的基本信息如表 6 所示。测试装置的参数设置为: 充电电压 500 V DC, 充电时间 200 s, 放电时间 100 s。2 台变压器的回复电压曲线如图 12 所示。测试所得回复电压的 3 个参数值如表 7 所示。从变压器中取得变压

表 6 2 台电力变压器的详细信息
Tab.6 Detailed information of two transformers

试品	型号	额定容量 / (kV · A)	投运时间
1 号	SL7-630/10	630	1987 年 8 月
2 号	S9-630/10	630	2001 年 6 月

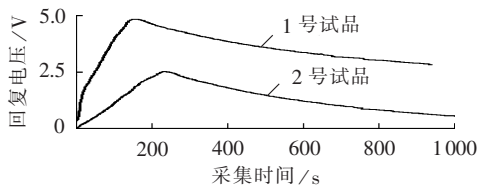


图 12 2 台变压器的回复电压曲线
Fig.12 Recovery voltage curves of two transformers

表 7 现场测试结果
Tab.7 Results of field test

试品	U_{max}/V	t_{cdom}/s	$S_i/(V \cdot s^{-1})$
1 号	4.808	127	83.50
2 号	2.504	239	11.25

器油和绝缘纸试样, 在实验室对试样中酸值进行测量。测量所得 1 号试品油纸试样的变压器油中酸值为 0.16 mgKOH/g, 绝缘纸中酸值达 22.47 mgKOH/g, 2 号试品油纸试样的变压器油中酸值为 0.08 mgKOH/g, 绝缘纸中酸值为 10.36 mgKOH/g。因此, 通过横向比较, 回复电压法的特征参数基本可以反映出变压器的绝缘状态。如果能够利用回复电压法在不同时期对每台变压器进行测试, 建立绝缘老化状态参数与回复电压特征参数的映射关系, 就可以更准确地获取变压器的绝缘状态。

6 结论

- a. 绝缘油中酸值随老化时间的增加呈指数增加, 绝缘纸中酸值随老化时间的增加呈线性函数增加。
- b. 高温极易引起绝缘纸 (纤维素分子) 裂解成含羟基的分子基团, 在有氧的环境中, 易被氧化成有机酸。在酸的作用下, 又加剧了绝缘纸的老化, 进而降低了变压器的绝缘性能。
- c. 回复电压最大值 U_{max} 随着绝缘纸中酸值的增加呈线性规律增大; 中心时间常数 t_{cdom} 随着绝缘纸中酸值的增加呈指数规律减小; 初始斜率 S_i 随着绝缘纸中酸值的增加呈指数规律增大。

由于现场变压器的生产厂家不一, 所用油纸绝缘材料的性能也各不相同。因此, 最好能够建立起每台变压器不同运行年限测试结果的数据库, 这样就可以更有效地获取变压器绝缘状态的评估结果。

参考文献:

[1] SAHA T K. Review of time-domain polarization measurements for assessing insulation condition in aged transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1293-1301.

- [2] ZAENGL W S. Application of dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2003,6(19):9-22.
- [3] NEMETH E. Measuring voltage response:a non-destructive diagnostic test method of HV insulation[J]. IEEE Proceeding of Science, Measurement and Technology,1999,146(5):249-252.
- [4] 高宗宝,吴广宁,周利军,等. 水分含量对变压器油纸绝缘系统回复电压参数影响规律的研究[J]. 高压电器,2011,47(4):37-41.
GAO Zongbao,WU Guangning,ZHOU Lijun,et al. Influence of moisture content on parameters of return voltage measurement in oil-paper insulation system of transformer[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(4):37-41.
- [5] 廖瑞金,郝建,梁帅伟,等. 水分和酸对矿物油与天然酯混合油-纸绝缘热老化的影响[J]. 电工技术学报,2010,25(7):31-37.
LIAO Ruijin,HAO Jian,LIANG Shuaiwei,et al. Influence of water and acid on the thermal aging of mineral oil mixed with natural ester oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,5(7):31-37.
- [6] 保定天威保变电气股份有限公司. 变压器试验技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000:458-528.
- [7] 中国国家标准化管理委员会. GB/T264—1983 石油产品酸值测定法[S]. 北京:中国标准出版社,1983.
- [8] LUNDGAARD L E,HANSEN W,INGEBRUGTSN S,et al. Aging of kraft paper by acid catalyzed hydrolysis[C]//2005 IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Washington DC,USA: IEEE Computer Society,2005:381-384.
- [9] LUNDGAARD L E,HANSEN W,INGEBRUGTSN S. Aging of mineral of impregnated cellulose by acid catalysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(5):540-546.
- [10] LUNDGAARD L E,HANSEN W,LINHJELL D,et al. Aging of oil-impregnated paper in power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(1):230-238.
- [11] 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 Ruijin,SUN Huigang,YUAN Quan,et al. Analysis of oil-paper insulation aging characteristics using recovery voltage method[J]. High Voltage Engineering,2011,37(1):136-142.
- [12] 江修波,张涛,黄彦婕. 变压器油纸绝缘极化谱的仿真研究[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):31-35.
JIANG Xiubo,ZHANG Tao,HUANG Yanjie. Simulation of transformer insulation polarization spectrum[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(2):31-35.
- [13] 刘刚,廖瑞金,冯运,等. 温度对变压器油纸绝缘系统回复电压参数影响规律的研究[J]. 高压电器,2010,46(1):80-84.
LIU Gang,LIAO Ruijin,FENG Yun,et al. Temperature influence on parameters of return voltage measurement of oil-paper insulation system in transformer[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(1):80-84.
- [14] TAPAN K S,PRITHWIRAJ P,FRANK M. Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):149-157.
- [15] LINHJELL D,LUNDGAARD L. Dielectric response of mineral oil impregnated cellulose and the impact of aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2007,14(1):156-169.
- [16] 刘枫林,徐巍. 石蜡基和环烷基变压器油的性能比较[J]. 变压器,2004,41(7):27-30.
LIU Fenglin,XU Wei. Characteristic comparison between paraffine-base and naphteene-base transformer oils[J]. Transformer,2004,41(7):27-30.
- [17] 廖瑞金,朱孟兆,杨丽君,等. 采用分子模拟法分析变压器油纸绝缘材料的相互作用[J]. 高电压技术,2011,37(2):268-275.
LIAO Ruijin,ZHU Mengzhao,YANG Lijun,et al. Analysis of interaction between transformer oil and cellulosic insulation paper using molecular simulation method[J]. High Voltage Engineering,2011,37(2):268-275.
- [18] 陆云才. 基于分子模拟的油纸绝缘老化机理及气体扩散行为研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.
LU Yuncai. Study on diffusion behavior of gas and mechanics of oil-paper aging using molecular simulation[D]. Chongqing: Chongqing University,2007.
- [19] 黄金保. 纤维素快速热解机理的分子模拟研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
HUANG Jinbao. Molecular simulation study of pyrolysis mechanism of cellulose[D]. Chongqing:Chongqing University,2010.
- [20] 刘仁庆. 纤维素化学基础[M]. 北京:科学出版社,1985:26-28.
- [21] MANLEEV V,BOURBIGOT S,YVON J. The facts and hypotheses relating to the phenomenological model of cellulose pyrolysis [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2009,84:1-17.

作者简介:

王晓剑(1987-),男,山西吕梁人,硕士研究生,主要从事高压电气设备故障诊断与在线监测的研究(E-mail: xjwang1987@126.com);

吴广宁(1969-),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事高压电气设备的教学与研究工作;

高波(1976-),男,四川成都人,副教授,博士研究生,主要从事高压电气设备的在线监测与故障诊断的研究。

Influence of acid value on recovery voltage parameters of transformer oil-paper insulation system

WANG Xiaojian¹,WU Guangning¹,LI Xianlang¹,GAO Bo¹,PENG Qian²,ZHAO Hu¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. State Grid Sichuan Province Electric Power Company Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: A simplified model of transformer is set up to research the influence of acid value on recovery voltage parameters. 25# transformer oil and ordinary cellulose paper are used as oil-paper composite insulation in aging experiment and results show that, the relationship between the acid value of insulating paper and the aging time is a linear function while that between the acid value of transformer oil and the aging time is an exponential function; along with the increase of insulating paper acid value, the maximum recovery voltage increases linearly, the central time constant decreases exponentially and the initial slope increases exponentially.

Key words: electric transformers; recovery voltage measurement; acid value; polymerization degree; maximum voltage recovery; central time constant; initial slope; models; insulation