

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.01.031

不均匀热老化油浸绝缘纸的极化/去极化电流特性研究

隋彬¹, 曹建军¹, 宋臻杰², 尹小兵³

(1. 雅砻江流域水电开发有限公司, 成都 610051; 2. 国网绍兴供电局, 浙江 绍兴 312000;
3. 四川电力设计咨询有限责任公司, 成都 610041)

摘要: 为研究温度梯度存在下, 变压器油浸绝缘纸不均匀老化极化/去极化电流特性, 文中在实验室条件下搭建不均匀热老化试验平台, 进行不同温度梯度作用下油浸绝缘纸的不均匀热老化试验。通过测定试样的聚合度和极化/去极化电流得出如下结论: 在温度梯度作用下, 高温受热绝缘纸的聚合度下降速率大于低温受热绝缘纸; 油浸绝缘纸老化后期, 聚合度下降速度变缓; 在同一温度等级下, 处于温度梯度下的油浸绝缘纸老化更严重。油浸绝缘纸受热温度升高, 其极化/去极化电流均向左上方平移, 电导率增大; 在同一温度等级下, 油浸绝缘纸不均匀老化下的极化/去极化电流值更大; 局部温度升高会加剧油浸绝缘纸老化。

关键词: 不均匀热老化; 油浸绝缘纸; 极化/去极化电流; 介电特性; 聚合度; 等温区

Study on Polarization/Depolarization Current Characteristic of Oil-impregnated Insulation Paper with Non-uniform Thermal Aging

SUI Bin¹, CAO Jianjun¹, SONG Zhenjie², YIN Xiaobing³

(1. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051, China; 2. State Grid Shaoxing Power Supply Company, Zhejiang Shaoxing 312000, China; 3. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: To investigate the polarization/depolarization current characteristics of transformer oil-immersed paper with non-uniform aging under temperature gradient, this paper build a non-uniform thermal aging test platform under laboratory condition and perform non-uniform aging thermal test under different temperature gradients for oil-impregnated paper. Then, make conclusions by measuring degree of polymerization and polarization/depolarization currents. The results show that degree of polymerization of high temperature heated objects reduce faster than low temperature heated objects under temperature gradient and reduce slow in final aging. At the same temperature grade, oil-impregnated paper aging more serious under temperature gradient. Higher oil-impregnated paper heated temperature, larger its polarization/depolarization currents and the conductivity. At the same temperature grade, the polarization and depolarization current values of oil-impregnated paper under temperature gradient are larger and local temperature rising will accelerate oil-impregnated paper aging.

Key words: non-uniform thermal aging; oil-impregnated insulation paper; polarization/depolarization current; dielectric property; degree of polymerization; isothermal zone

0 引言

油浸式变压器作为电网中能量传输最为重要的高压设备之一, 一旦发生故障将对国民经济造成不可估量的损失^[1-2]。油浸式变压器的绝缘系统主要由变压器油和绝缘纸构成, 在变压器运行过程中, 油纸绝缘长期受到热、电、机械和化学等外部应力的综合作用, 会产生水分、水溶性酸、呋喃化合物

等老化产物, 造成其绝缘性能下降, 影响变压器的安全稳定运行^[3-4]。变压器油绝缘性能可通过滤油、换油等措施得到改善及修复, 故油浸绝缘纸是影响变压器安全、稳定运行的主要因素^[5-7]。绝缘纸聚合度(degree of polymerization, *DP*)是衡量绝缘纸老化程度最准确、可靠的指标之一^[8], 但其取样需要吊罩取芯, 操作复杂, 且有可能会破坏绝缘结构, 不适合变压器现场检测, 只适合实验室环境。

以时域介电响应理论为基础的极化/去极化电流法(polarization and depolarization current, PDC)不

但对油纸绝缘受潮状态反应灵敏,且其具有受到现场干扰的影响较小,试验简单,对绝缘没有损伤等优点,受到了广泛的关注。文[9]通过统计学的方法建立了纤维素降解的老化动力学模型;文[10]通过建立时域极化模型,求解微水扩散不平衡时的极化/去极化电流。以上研究都是在实验室均匀老化基础上得来,并未考虑温度梯度作用下油浸绝缘纸的PDC电流特性。文[11]较早提出了变压器油纸绝缘受到温度梯度影响产生不均匀老化现象,基于扩展Debye模型^[12],提出修正Debye模型作为不均匀老化油纸绝缘等效电路模型,但是其并未研究不均匀老化时PDC曲线的变化规律。

文中通过搭建不均匀热老化平台,在实验室条件下对油纸绝缘试样分别进行不均匀热老化和均匀热老化试验,并测量老化后油浸绝缘纸的DP、极化/去极化电流和电导率。将不均匀老化试验结果与均匀老化试验结果相比较,得出油浸绝缘纸在不均匀老化下的极化/去极化电流特性,为极化/去极化电流法更好地在实际工程应用提供理论基础。

1 理论基础

1.1 PDC测试原理

PDC试验的原理和波形示意图见图1。对已经完全放电的电介质施加一个阶跃电压 $U(t)$,见式(1)。式(1)中, U_0 为所加直流电源。

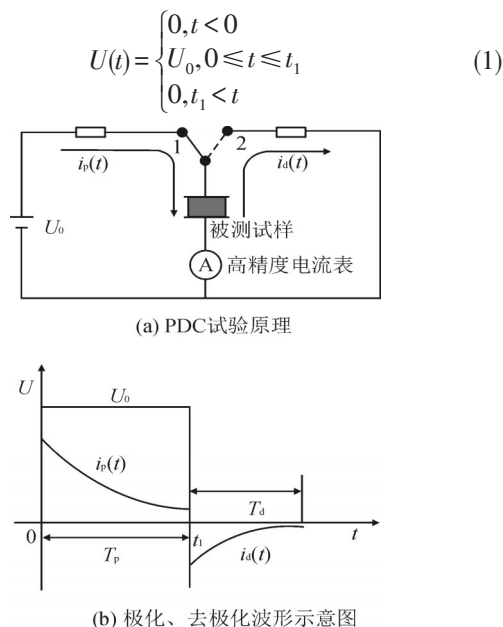


图1 PDC试验原理及其波形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test principle and waveform of polarization and depolarization current measurement

在0时刻,将图1(a)中开关向1闭合,被测试样中将流过由电导电流和各种极化引起电流叠加组

成的极化电流 $i_p(t)$, $i_p(t)$ 可表示为

$$i_p(t) = C_0 U_0 [\sigma_r / \varepsilon_0 + f(t)] \quad (2)$$

式(2)中: C_0 是介质的几何电容; ε_0 是介质的真空电导率; σ_r 是油纸复合绝缘的整体电导率; $f(t)$ 是复合绝缘的介电响应函数^[13]。

在 t_1 时刻,将图1(a)中开关向2闭合,短接被测试样两端,被测试样中将流过和 $i_p(t)$ 方向相反的去极化电流 $i_d(t)$,则

$$i_d(t) = C_0 U_0 [f(t) - f(t + t_1)] \quad (3)$$

式(3)中, t_1 表示去极化过程开始时刻。在被测试样去极化过程中,介电响应函数 $f(t + t_1)$ 几乎已经衰减为0,此时由式(2)、(3)可计算油纸绝缘电导率,即

$$\sigma_r \approx \frac{\varepsilon_0}{C_0 U_0} [i_p(t) - i_d(t)] \quad (4)$$

1.2 温度梯度下不均匀老化

变压器壳体和绕组之间存在温度梯度,绕组的温度高,壳体的温度低。位于两者之间的油纸绝缘在温度梯度的影响下发生不均匀老化^[10],温度梯度在油纸绝缘径向上的分布见图2。图2中, x 为离绕组外表面的距离。

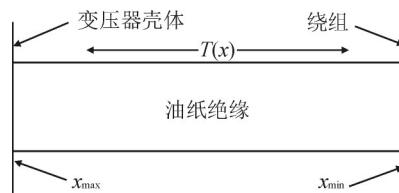


图2 油纸绝缘及其受到的温度梯度 $T(x)$ 示意图

Fig.2 Schematic representation of oil-paper insulation and temperature gradient $T(x)$ across it

1.3 均匀介质传热原理

介质的热传导速率由其内部的温度分布情况决定,介质内部温度分布总和即为该时刻下的温度场^[14]。一般情况下,介质内部任一点温度可表示为

$$T = f(x, y, z, t) \quad (5)$$

式(5)中: x, y, z 为介质内任一点的空间坐标; T 为温度; t 为时间。

介质内部各点的温度随时间保持不变,且在空间上只沿着一个坐标方向变化,可称为定态一维温度场,即

$$\text{grad} T = \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

当单层平壁状均匀介质的平壁面积远大于其厚度时,从平壁边缘流失的热量可以忽略不计,此时其导热系数不随温度变化而沿平壁厚度方向变化。在这种情况下^[15],平壁状均匀介质的导热速率、导热系数、导热面积和温度梯度的关系为

$$Q = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

式(7)中: Q 为导热速率; λ 为材料的导热系数; S 为导热面积。

根据式(7)可推导出单层平壁均匀介质在厚度方向上的温度分布情况, 见图3。温度分布参数可以根据具体的边界条件求出^[16]。

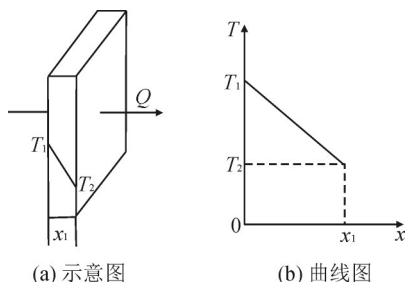


图3 单层平壁热传导温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of single planomural heat conduction

2 试验方法及装置

文中用于不均匀热老化试验的油纸绝缘试样为克拉玛依25号矿物油和厚度为0.3 mm的普通牛皮绝缘纸。试验开始前, 需要对油纸绝缘试样进行干燥、浸油处理, 见图4^[17]。

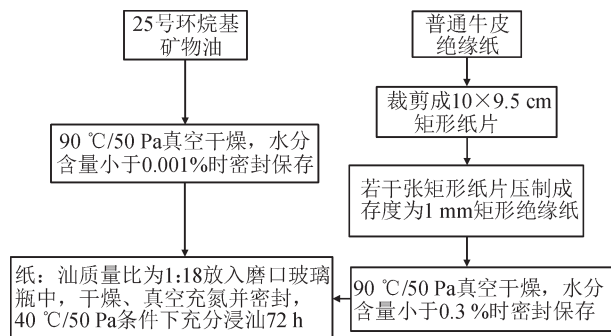


图4 干燥、浸油处理流程

Fig. 4 Drying and oil-impregnated process

将涂有绝缘漆的电阻丝(内侧电阻丝), 较紧密地缠绕在高为10 cm、直径为3 cm的铁芯棒上, 然后将浸油后的绝缘纸分3层缠绕电阻丝上, 并在最外层绝缘纸上用与纸尺寸相当的铜板缠绕固定, 最后在铜板外较紧密缠绕涂有绝缘漆的电阻丝(外侧电阻丝)。电阻丝经导线与外部可调直流稳压电源相连, 并在铁芯顶部和最外层电阻丝上布置光纤温度传感器检测内、外侧电阻丝温度。加热装置示意图见图5。

在内、外电阻丝之间, 3层绝缘纸的受热温度各不相同。每层绝缘纸都是紧密压制, 故根据均匀介质传热原理, 温度梯度在3层绝缘纸中线性变化, 如图3所示。将加热装置以油纸质量比18:1装入试验

箱中, 然后将试验箱放入恒温箱保持50 °C。

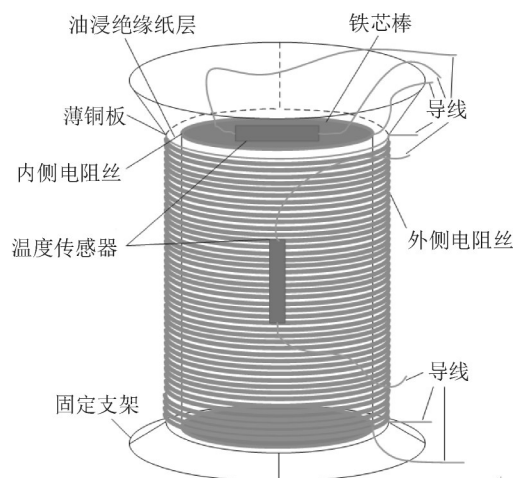


图5 加热装置

Fig. 5 Heating device

控制内侧电阻丝和外侧电阻丝的发热温度分别为115 °C和85 °C对油浸绝缘纸进行不均匀热老化试验100 d, 得到试样A; 其他条件不变情况下, 改变内侧电阻丝和外侧电阻丝温度分别为125 °C和95 °C, 得到试样B; 另取3张1 mm的压制绝缘纸以油纸质量比18:1, 放入试验箱中进行均匀热老化, 热老化温度为100 °C, 得到试样C。各组试样的老化说明见表1。

表1 油浸绝缘纸试样老化说明

Table 1 Aging explanation of oil immersed paper samples

组别及编号	受热位置	温度梯度
A	A ₁ 贴近内侧电阻丝	105~115 °C
	A ₂ A ₁ 、A ₂ 之间	95~105 °C
	A ₃ 贴近外侧电阻丝	85~95 °C
B	B ₁ 贴近内侧电阻丝	115~125 °C
	B ₂ B ₁ 、B ₂ 之间	105~115 °C
	B ₃ 贴近外侧电阻丝	95~105 °C
C	C ₁ 贴近内侧电阻丝	100 °C均匀老化
	C ₂ C ₁ 、C ₂ 之间	100 °C均匀老化
	C ₃ 贴近外侧电阻丝	100 °C均匀老化

绝缘纸 DP 测量采取对同一试样3个不同部位测定并取平均值作为其 DP 测定值的方法(所有绝缘纸的初始聚合度都为1 153), 纸中水分含量测定采用卡尔费休滴定法, 并使用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察油浸绝缘纸的表面微观结构变化。极化/去极化电流的测量仪器为PDC-Analyser-1MOD, 每次测试前都要对试样进行接地放电2 h。

需要对不均匀热老化试验中各层绝缘纸所处的温度环境进行如下说明: 根据均匀介质传热理论, 温度沿受热对象厚度方向线性变化, 因此各受

热对象都以其所处温度梯度的中间值作为其受热温度,如A₂、B₃受热温度都为100℃。

3 试验结果及分析

3.1 绝缘纸聚合度和SEM结果

对以表1中老化方式老化100 d后的各组试样进行DP测量和SEM观察,各组试样的DP值见表2。各绝缘纸表面放大500倍照片见图6。因篇幅所限,图6只列出试样A₁、A₃、B₁、B₃和C₂的SEM图片。

表2 老化100 d后各组试样DP值

Table 2 DP values of samples in each group after aging 100 days

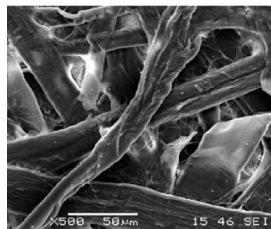
编号	DP	编号	DP	编号	DP
A ₁	410	B ₁	219	C ₁	766
A ₂	690	B ₂	456	C ₂	768
A ₃	893	B ₃	641	C ₃	767



(a) A₃(90 °C, DP 893)



(b) A₁(110 °C, DP 410)



(c) B₃(100 °C, DP 641)



(d) B₁(120 °C, DP 219)



(e) C₂(100 °C, DP 768)

图6 部分试样表面的SEM图片

Fig. 6 SEM of some samples surface

表2中,比较A₁、A₂、A₃和B₁、B₂、B₃的DP值可以得出,在温度梯度的作用下,高温受热对象的DP下降幅度大于低温受热对象,且A组的受热对象DP普遍要高于B组对应受热对象的DP,如A₁的DP高于B₁、A₃的DP高于B₃。绝缘纸老化速率对数和温度的关系为

$$\ln k = 20.7262 - \frac{13\,344.079\,31}{\theta + 273} \quad (8)$$

式(8)中: k 为老化速率; q 为受热温度^[18]。显然,受热温度的巨大差异导致了不同受热对象DP下降速率的不同。

从表2中还可以得出,B组受热对象间的DP差异普遍要小于A组受热对象间的DP差异,如A₁、A₃的DP差异为483,而B₁、B₃的DP差异为422。相同变化范围的温度梯度(A组、B组试样不均匀受热温度差异均为30℃)作用相同的时间(100 d),试样间的DP差异不同。

这是因为纤维素是由70%的结晶部分和30%的无定型区组成。无定型区中纤维素分子排列混乱,分子间作用力较小,老化先在无定型区发生且反应速度较快,此时DP下降较为迅速;在无定形区老化反应结束后,老化反应开始在结晶区发生,结晶区纤维素分子排列较为规整,分子间作用力较大,此时DP下降速度变慢。

从图6中可以看到,不同老化程度的油浸绝缘纸表面的SEM照片。其中A₃对应的图6(a)中纤维排列紧密,表面光滑,粗细较为均匀;B₃在更高受热温度的影响下,DP下降到641,对应的图6(c)中纤维逐渐变细,表面逐渐开裂;处于温度梯度较高受热温度的A₁和B₁老化程度更为严重,DP分别下降至410和219,分别对应图6(b)和图6(d),图6(b)中纤维表面开裂现象加剧,并开始断裂,图6(d)中纤维表面开裂以及断裂现象加剧,纤维间距显著增加,排列非常疏散;100℃均匀老化试样C₂的DP为768,纤维开始变细,但表面仍较为光滑,如图6(e)所示。

根据均匀介质传热理论,A₂、B₃的受热温度与C₂相同,均为100℃。但在相同的老化时间下,各试样的DP间产生了差异,A₂的DP为690,B₃的DP为641,C₂的DP为768。A₂处于95~105℃的温度梯度中,沿厚度方向受热不均匀,在100~105℃中受热绝缘纸纤维素率先降解,导致含氧浓度增加,较高的含氧量配合油中老化产物有机酸等,催化了一系列更为复杂的氧化、断链反应,加速了热老化过程^[17],故A₂的DP小于C₂的DP;B₃也处于95~105℃温度梯度中,但是其紧贴低温热源,散热条件相较A₂恶劣,故其DP更小。

3.2 绝缘纸PDC电流曲线

试样A的3个受热对象在不均匀老化100 d后的极化/去极化电流曲线见图7。从图7可以看出:随着测量时间的增加,极化/去极化电流不断减小;其中,极化电流曲线衰减到一定值后保持稳定,去极化电流后期下降速度变缓。并且还可看出,随着受热温度升高,极化/去极化电流均向左上方平移,极化电流达到稳定的时间缩短,表明油浸绝缘纸中

各种极化的强度以及引起的电流都在增强,相应极化的响应速度提高;受热温度的升高还使极化电流稳定时电流值变大,表明油浸绝缘纸的电导率也在增加^[18-19]。这是因为受热温度越高,油浸绝缘纸老化越严重,产生更多老化产物和导电粒子,从而提高油浸绝缘纸电导率和纸内极化的响应速度。

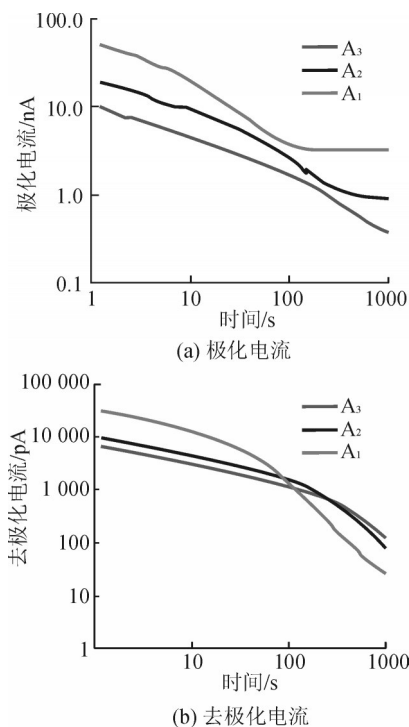


图7 试样A的3个受热对象的PDC曲线

Fig. 7 PDC curves of three heated objects of sample A

根据式(4)计算出的各组油浸绝缘纸电导率见表3。从表3可得,在较高受热温度中老化的绝缘纸电导率值更大,如A₁的电导率大于A₂、A₃的电导率,这可以用更高的温度提升了纸内导电粒子数量和迁移率来解释。

表3 老化100 d后各组试样电导率

Table 3 Conductivity of samples in each group after aging 100 days

编号	电导率/ (S·m ⁻¹)	编号	电导率/ (S·m ⁻¹)	编号	电导率/ (S·m ⁻¹)
A ₁	7.32×10 ⁻¹³	B ₁	9.81×10 ⁻¹²	C ₁	8.59×10 ⁻¹⁴
A ₂	1.02×10 ⁻¹³	B ₂	1.31×10 ⁻¹²	C ₂	8.62×10 ⁻¹⁴
A ₃	5.71×10 ⁻¹⁴	B ₃	1.22×10 ⁻¹³	C ₃	8.55×10 ⁻¹⁴

受热温度均为100℃的3个试样A₂、B₃和C₂的PDC曲线见图8。极化/去极化电流曲线的形状和图7中类似,B₃的幅值最大,C₂的幅值最小。受热温度相同,油浸绝缘纸的极化/去极化电流产生差异。这是因为A₂、B₃的受热方式为不均匀老化,受热温度较高部分的纤维素会率先裂解^[18],释放氧气加速绝缘纸老化,故均匀老化试样C₂的极化/去极化电流幅

值最小;B₃和A₂两端受热温度梯度相同,但因B₃紧贴低温热源,散热条件不佳导致纸内局部温度升高,造成B₃内极化强度和速度均大于A₂,故A₂的极化/去极化电流幅值大于B₃。

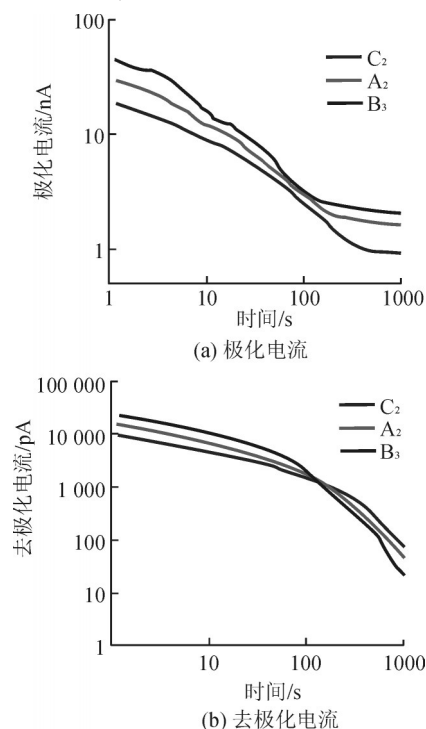


图8 相同环境温度,不同受热条件下PDC曲线的变化

Fig. 8 PDC curves variation at same temperature in different heated conditions

4 试验结果进一步讨论

文中对3层油浸绝缘纸两端进行加热,模拟了油浸绝缘纸的不均匀热老化过程,在一定的近似假设下,研究了油浸绝缘纸在温度梯度作用下的聚合度、极化/去极化电流特性。这种实验方法和测试结果为在实验室模拟变压器中油浸绝缘纸的老化过程提供了参考。然而文中研究的试样结构与实际变压器油纸绝缘结构有所差异,通过研究不同结构油浸绝缘纸试样的不均匀热老化特性,消除变压器结构对介电特性的影响是今后要开展的工作。

5 结论

1)在温度梯度的作用下,高温受热对象的DP下降速率大于低温受热对象;在油浸绝缘纸老化后期,DP下降速度变缓;在同一温度等级下,处于温度梯度下的油浸绝缘纸老化更严重,DP下降越快。

2)温度梯度变化范围相同时,油浸绝缘纸受热温度升高,其极化/去极化电流均向左上方平移,电导率增大;受热温度相同时,油浸绝缘纸不均匀老化时的

极化/去极化电流值比在均匀老化时要大;散热条件不佳会导致局部温度升高,加剧油浸绝缘纸老化。

参考文献:

- [1] 杨丽君,齐超亮,邓帮飞,等. 采用修正 Cole-Cole 模型提取油纸绝缘频域介电谱的特征参量方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 310-317.
YANG Lijun, QI Chaoliang, DENG Bangfei, et al. Application of modified Cole-Cole model to extract characteristics of frequency dielectric spectroscopy of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 310-317.
- [2] 操敦奎,许维宗,阮国方. 变压器运行维护与故障分析处理[M]. 北京:中国电力出版社, 2008: 10-79.
CAO Dunkui, XU Weizong, RUAN Guofang. Operation maintenance and fault analysis of transformers[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 10-79.
- [3] 廖瑞金,唐超,杨丽君,等. 电力变压器用绝缘纸热老化的微观结构及形貌研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33): 59-64.
LIAO Ruijin, TANG Chao, YANG Lijun, et al. Research on the microstructure and morphology of power transformer insulation paper after thermal aging[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(33): 59-64.
- [4] 董明,孟源源,徐长响,等. 基于支持向量机及油中溶解气体分析的大型电力变压器故障诊断模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 88-92.
DONG Ming, MENG Yuanyuan, XU Changxiang, et al. Fault diagnosis model for power transformer based on support vector machine and dissolved gas analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 88-92.
- [5] EMSLEY A M, XIAO X, HEYWOOD R J, et al. Degradation of cellulosic insulation in power transformers, Part 3: Effect of oxygen and water on aging in oil[J]. IEEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, 2000, 147(3): 115-119.
- [6] SUPRAMANIAM G K, HUSSIEN Z F, AIZAM M. Application of frequency domain spectroscopy(FDS) in assessing dryness and ageing state of transformer insulation systems [C]//IEEE International Conference on Power and Energy. Johor Baharu, Malaysia: IEEE, 2008: 55-61.
- [7] WEI J L, ZHANG G J, DONG M, et al. Research progress on insulation condition estimation for oil-immersed power transformer[C]//Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials(ISEIM 2008). Yokkaichi, Japan: IEEJ, 2008: 32-35.
- [8] 马元. 变压器绝缘老化检测试验与寿命评估方法研究[D]. 济南:山东大学, 2010.
MA Yuan. Studies on methodology of insulation status measurement and life assessment of power transformers[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [9] EKENSTAM A. The behaviour of cellulose in mineral acid solutions: Kinetics study of the decomposition of cellulose in acid solution[J]. Berichte, 1936, 5(1): 553-559.
- [10] 王林,周利军,李先浪,等. 应用极化/去极化电流法分析油纸绝缘微水扩散暂态过程[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 354-359.
WANG Lin, ZHOU Lijun, LI Xianlang, et al. Analysis of transient moisture diffusion in oil-paper insulation using polarization and depolarization current method[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 354-359.
- [11] BARAL A, CHAKRAVORTI S. A modified maxwell model for characterization of relaxation processes within insulation system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(2): 524-534.
- [12] SAHA T K, PURKAIT P. Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 149-157.
- [13] JONSCHEER A K. Dielectric relaxation in solids[M]. London: Chelsea Dielectrics Press, 1983: 42-47.
- [14] 胡汉平. 热传导理论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2010: 209-228.
HU Hanping. Heat conduction theory[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010: 209-228.
- [15] 廖瑞金,汪可,尹建国,等. 初始水分含量对油纸绝缘热老化特性的影响[J]. 高电压技术, 2012, 35(8): 1172-1178.
LIAO Ruijin, WANG Ke, YIN Jianguo, et al. Influence of initial moisture on thermal aging characteristics of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 35(8): 1172-1178.
- [16] 张欲晓,李胜利,王梦君,等. 变压器绝缘纸的聚合度变化规律[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2458-2463.
ZHANG Yuxiao, LI Shengli, WANG Mengjun, et al. Degree of polymerization of insulation paper in the transformers[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2458-2463.
- [17] 王伟,马志青,李成榕,等. 纤维素老化对油纸绝缘水分平衡的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 100-105.
WANG Wei, MA Zhiqing, LI Chengrong, et al. Impact of cellulose aging on moisture equilibrium of oil-pressboard insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 100-105.
- [18] 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.
- [19] DRVENIZA M. Investigations effective methods for assessing the condition of insulation in aged power transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1214.

隋彬(1978—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化。