

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.09.021

基于绝缘纸电导率定量评估绝缘纸含水量的研究

张 涛¹, 周远化^{1,2}, 周远科³, 李红艳⁴

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443000; 2. 国网六安供电公司, 安徽 六安 237000; 3. 国网安徽省电力公司, 合肥 230000; 4. 国网蚌埠供电公司, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 定量评估油纸绝缘系统中绝缘纸的含水量,能有效为变压器干燥提供决策依据,延长变压器的使用寿命。极化/去极化电流法能无损检测油纸绝缘系统的电导率,文中基于极化/去极化电流(PDC)测量方法,采用极化/去极化电量差计算出绝缘纸电导率,研究了不同含水量浸油绝缘纸电导率的变化规律;并对比了电导电流法与极化/去极化电量差法计算系统电导率时的误差;最后应用电量差法求出了绝缘纸的电导率,采用最小二乘法对绝缘纸电导率与水分含量进行拟合,获得了绝缘纸电导率与绝缘纸含水量之间的定量关系。研究表明:电量差法比电导电流法的计算精度更高,绝缘纸的电导率与水分含量呈指数函数关系,因而绝缘纸电导率可定量评估绝缘纸中的含水量。

关键词: 水分;极化/去极化电量差;电导率;油纸绝缘;变压器

Study on Quantitative Evaluating Water Content of Insulating Paper Based on Conductivity of Insulating Paper

ZHANG Tao¹, ZHOU Yuanhua^{1,2}, ZHOU Yuanke³, LI Hongyan⁴

(1. College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. State Grid Lu'an Power Electric Supply Company, Anhui Lu'an 237000, China; 3. State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230000, China; 4. State Grid Bengbu Power Electric Supply Company, Anhui Bengbu 233000, China)

Abstract: To quantitatively evaluate moisture content in insulating paper in oil paper insulation system, the polarization/depolarization current (PDC) measurement method is employed for the conductivity of oil immersed insulating paper. The conductivity of the insulating paper is calculated via polarization/depolarization charge difference, and the variation of the conductivity of the insulating paper with different water content is analyzed. Moreover, the calculation error of the conductivity between the conductance current method and the polarization/depolarization charge difference method is discussed, and the quantitative relationship between conductivity and moisture content of the insulating paper is fitted by the least square method. The results show that: the calculation accuracy of the charge difference method is higher than that of the conductance current method, and the relationship between conductivity and moisture content of the insulating paper is an exponential function, therefore the conductivity of the insulating paper can be used to evaluate the moisture content of the insulating paper quantitatively.

Key words: moisture content; polarization/depolarization charge difference; conductivity; oil paper insulation; transformer

0 引言

变压器在长期运行中,在各种内部和外部因素的共同作用下,其油纸绝缘状态逐渐劣化,进而导

致变压器的故障率大大增加^[1]。水分作为油纸绝缘的“头号杀手”,会很大程度的破坏油纸系统的绝缘状态,同时还会加速油纸系统的老化进程^[2]。由于变压器中的水分99%存在于绝缘纸中,而变压器纸

收稿日期:2019-02-11; 修回日期:2019-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51307097)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51307097).

样难以获取,因此无损的对受潮纸样中的水分进行评估研究具有非常大的现实意义^[3]。

传统的卡尔费休法虽然可以准确地测量纸板的含水量,但该方法需要对绝缘纸进行取样,不利于现场变压器的诊断^[4-5]。很多学者对采用油中微水含量根据水分平衡曲线来估算纸中水分含量的方法提出了质疑^[6-7],因为水分在油纸系统中的分配情况受众多因素的作用,不能仅仅采用平衡曲线去推算。近年来,以介质极化理论为基础的介电响应测试法,由于其可以无损地评估变压器油纸绝缘状态而受到了广泛研究^[8-10]。国外学者 Ekanayake C 等^[11]提出频率介电谱法可以评估绝缘纸板中的含水量,但是如何定量地对纸板中的含水量进行评估分析,作者并未给出。国内学者许渊^[12]提出频率介电谱技术可以对变压器绝缘纸板进行评估,但是相比于极化/去极化电流 (polarization/depolarization current PDC)法而言,该方法耗时较长,且当纸板含水量较低时,准确度不高。目前,极化/去极化电流(PDC)法作为一种可用于区分绝缘油和绝缘纸绝缘信息的无损电气诊断技术受到了国内外学者的广泛关注^[13-15]。基于PDC基础上的极化/去极化电量差法因其可以减小现场噪声干扰,缩短极化/去极化测量时间而受到了深入研究^[16-18]。文中采用极化/去极化电量差法计算出了绝缘纸的电导率,再将绝缘纸电导率与纸板含水量进行拟合,得到了绝缘纸电导率与含水量之间的定量关系。

1 PDC理论及油纸绝缘电导模型

1.1 PDC测试原理

PDC原理图见图1,当样品两端被加上正向的电压 U_0 时,此时产生的电流为极化电流 i_p ^[13, 19],极化电流由位移电流、吸收电流和泄漏电流3部分组成,其中位移电流是对试品几何电容进行充电时产生的电流,在极短时间内就会衰减完毕,因此可忽略不计,故极化电流的表达式为

$$i_p(t) = C_0 U_0 \left[\frac{\sigma_r}{\varepsilon_0} + f(t) \right] \quad (1)$$

式(1)中: C_0 为几何电容; ε_0 为真空介电常数; σ_r 为油纸绝缘系统的电导率; $f(t)$ 为时域响应函数,反映了介质的弛豫过程,其中,式(1)展开式的前一项代表泄漏电流,后一项代表吸收电流;当直流电压被撤去后,对样品进行短接放电,此时的放电电流为去极化电流 i_d ^[20],去极化电流由位移电流和吸收电流两部分共同组成,同极化电流舍去位移电流,去极化电流可表示为

$$i_d(t) = C_0 U_0 \cdot [f(t) - f(t + t_c)] \quad (2)$$

式(2)中: t_c 为极化时间; $f(t)$ 和 $f(t + t_c)$ 都为介质响应函数,分别反映了极化和去极化过程中的弛豫过程。

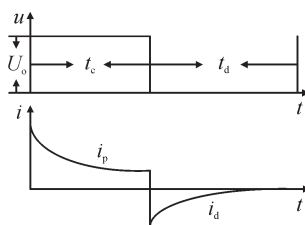


图1 极化/去极化电流原理图

Fig. 1 Principle of polarization depolarization current

1.2 油纸绝缘系统的电导率

当测量时间较长时, $f(t + t_c) \approx 0$, 则由式(1)、(2)可得油纸系统的整体电导率为

$$\sigma_r \approx \frac{\varepsilon_0}{C_0 U_0} [i_p(t) - i_d(t)] = \frac{\varepsilon_0 i_{dc}(t)}{C_0 U_0} \quad (3)$$

式(3)中, $i_{dc}(t) = i_p(t) - i_d(t)$ 。

由于极化过程和去极化过程中产生的位移电流、吸收电流近似相等,因此式(3)中极化电流与去极化电流之差 ($i_{dc}(t)$) 为泄漏电流也称电导电流。

变压器油纸绝缘系统由油隙、一系列纸板以及支撑作用的撑条共同构成。为了便于分析,常将该结构简化,即将所有油道、纸筒和撑条分别集成得到 X-Y 模型, X-Y 模型被广泛用来诊断变压器油纸绝缘系统的状态^[21-23]。近年来,国外学者^[24]将 X-Y 模型做了更进一步的简化,省略掉起支撑作用的撑条,得到了只有油纸结构的串联模型,简称 X 模型,通常 X 值在 0.2 ~ 0.5 之间,见图2。



图2 变压器主绝缘 X 模型

Fig. 2 X model of transformer main insulation

对于简化的 X 模型,油纸系统的电导率可以写成

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{\text{paper}} \cdot \sigma_{\text{oil}}}{\sigma_{\text{paper}} \cdot (1 - X) + \sigma_{\text{oil}} \cdot X} \quad (4)$$

式(4)中,根据该实验室的试品实际情况, X 取值为 0.35。

若 $\sigma_{\text{oil}} \gg \sigma_{\text{paper}}$, 则式(4)可以写成

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{\text{paper}}}{X} \quad (5)$$

由式(3)和(5)可得

$$\sigma_{\text{paper}} = \frac{\varepsilon_0 X}{C_0 U_0} i_{dc}(t) \quad (6)$$

同式(3), 因为电导电流曲线后期反映了绝缘纸的信息^[25], 因此采用电导电流计算绝缘纸电导率时, t 取电导电流后期时的时间, 也即取电导电流趋于稳定时的时间。

1.3 绝缘纸电导率与极化/去极化电量差斜率之间的关系

极化/去极化电流曲线反映了不同充放电时间下的电流情况, 为了考虑极化/去极化电流随时间累积过程中的极化特性, 通过极化/去极化电流对时间进行数值积分累加, 可分别获得充电和放电过程中所产生的电荷量见式(7)、(8)^[17]:

$$q_p(t_i) = \sum [i_p(t_i) \times t_i] \quad (7)$$

$$q_d(t_i) = \sum [i_d(t_i) \times t_i] \quad (8)$$

令 $i_{dc}(t_i) = i_p(t_i) - i_d(t_i)$, 其中 $i_p(t_i)$ 和 $i_d(t_i)$ 分别指任意时刻的极化电流和去极化电流。则由式(7)、(8)可得极化/去极化电量差函数为

$$q_p(t_i) - q_d(t_i) = \sum i_{dc}(t_i) \cdot t_i \quad (9)$$

电荷量差函数是电导电流对时间的积分, 而电导电流随时间的变化不大, 因此电量差函数是一条随测量时间的增加呈线性增长的直线, 且直线斜率处处近似相等, 该直线的斜率即极化/去极化电量差的斜率, 可以定义为

$$k(i) = \frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1} \quad (10)$$

式(10)中: t_2 和 t_1 为测量的时间, 且 $t_2 > t_1$; q_2 和 q_1 分别为测量时间 t_2 和 t_1 所对应的电量差。由式(9)、(10)可以得到

$$i_{dc}(t_i) = \frac{q(t_i)}{t_i} = k \quad (11)$$

式(11)中: t_i 代表测试时的任意时刻; $q(t_i)$ 表示试样在 t_i 处积累的电荷量。由式(3)、(6)可知油纸系统整体电导率以及绝缘纸电导率都与电导电流有关, 故由式(11)可得系统电导率和绝缘纸电导率可用电量差斜率表示, 分别为:

$$\sigma_r = \frac{\varepsilon_0 k}{C_0 U_0} \quad (12)$$

$$\sigma_{\text{paper}} = \frac{\varepsilon_0 X}{C_0 U_0} k \quad (13)$$

该模型推导了绝缘纸电导率与极化/去极化电量差斜率之间的关系, 这为利用绝缘纸电导率评估纸中含水量奠定了基础。

2 实验样本的制备及极化/去极化电流测试

2.1 不同含水量纸样的制备

为了将极化/去极化电量差法应用到绝缘纸电导

率的计算中, 文中在实验室条件下制备了纸板含水量不同的油纸绝缘试品。实验所用材料为厚 0.5 mm, 直径 110 mm 的普通纤维素绝缘纸和 25 号美力高矿物质油。样本制作流程见图 3。本次实验的充电电压为 1 000 V, 充电时间为 3 000 s, 在测试电极外增加保护电极以消除边缘效应的影响。本次实验在 30 °C 恒温箱中进行, 以消除温度不同而对 PDC 特性的影响。文中的测量仪器选用的是 Keithley 6715B 型静电计, 其测量精度可以达到 pA 级别, 因而能够很精确的记录极化/去极化电流随测量时间的变化情况。

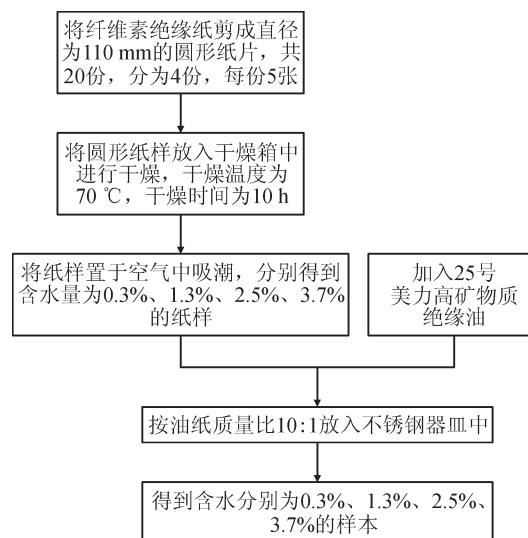


图 3 水分样本制作流程

Fig. 3 Moisture samples production process

图 3 中样本的含水量是采取称重法获得的, 计算公式为

$$m\% = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100\% \quad (14)$$

式(14)中: m_1 代表吸潮后的纸板重量; m_2 代表纸板干燥后的重量。

2.2 PDC 测量结果

根据上述测试平台, 获得了不同水分样本的 PDC, 因为 4 种样本的极化/去极化电流较小且电流前期的变化比较明显后期已趋于稳定, 为了让图更清晰, 故局部放大了前 600 s 的 PDC, 见图 4。

由图 4 可见, PDC 会随着水分含量的增加而增大, 在 PDC 始端, 4 个样本的电流区分度并不是很大, 且 PDC 受到了噪声干扰, 这是因为油纸绝缘内部可以等效为多个电容电阻支路的并联, 但是在测量过程中比如人与大地构成的电场、其他杂质等也可能对实验测量造成影响, 而且 PDC 达到了 nA 级别, 故很容易受到干扰。根据上述极化/去极化电流之差可以求出 4 种水分样品的电导电流, 见图 5。

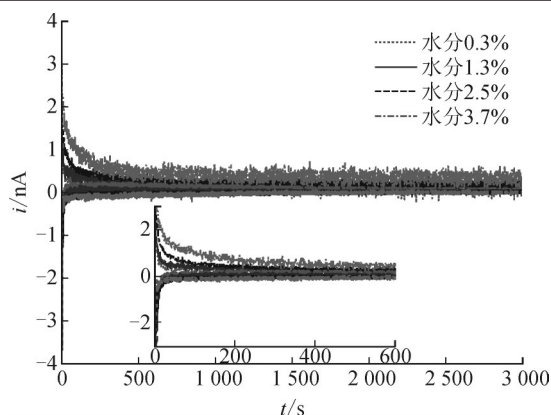


图4 不同水分样本的PDC

Fig. 4 PDC in different moisture content

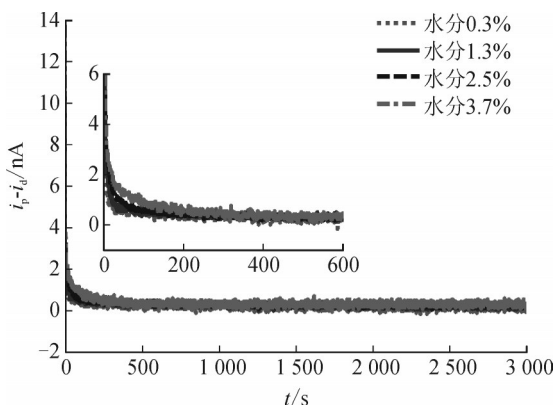


图5 不同水分样本的电导电流

Fig. 5 Electrical current in different moisture content

由图5可见,在同一温度下,随着水分含量的增加,电导电流呈递增趋势,这表明水分含量的增大使得样本的导电性增强,即油纸系统的绝缘性能变差,且由图5可得电导电流受噪声干扰较大。在测量后期,电导电流逐渐趋于平稳,这是因为随着极化去极化测试时间的增加,系统的极化去极化过程逐渐趋于稳定,而电导电流为极化与去极化电流之差,因此电导电流也逐渐趋向于稳定。

2.3 极化去极化电量差的计算

极化/去极化电量差是由电导电流和时间的积分所得,根据式(9)计算获得了不同水分样本的极化去极化电量差随时间的关系曲线,见图6。

由图6可见,电量差相比于PDC和电导电流抗噪声干扰能力更强,这是因为极化/去极化电量差是对极化电流与去极化电流之差进行积分求得的,极化电流与去极化电流在取差、积分过程中,一些噪声干扰可以相互抵消,因此最后求得的电量差可以很大程度地减小噪声的干扰。此外,从图中还可以看出:不同水分样本的极化/去极化电量差随测量时间的增加呈递增状态,但每个样本的斜率随时间的递增而近似保持不变。

由式(13)可知需要先计算出电量差的斜率,文

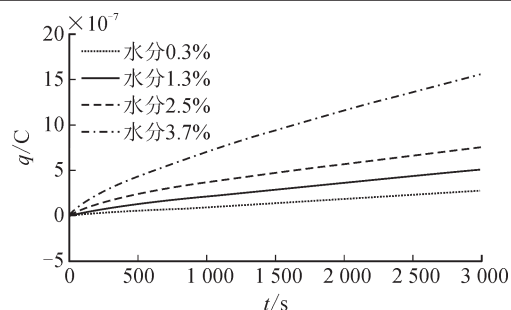


图6 不同水分样本的电量差曲线

Fig. 6 Charge difference curves under different moisture content

中根据图6和式(11)计算出了不同水分情况下极化/去极化电量差所对应的斜率,计算结果见表1。

表1 不同水分下电荷所对应的斜率

Table 1 The slope of charge under different moisture content

水分含量 $m/\%$	斜率 $k/(\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$
0.3	8.890×10^{-11}
0.3	1.669×10^{-10}
2.5	2.498×10^{-10}
49.0	5.160×10^{-10}

3 采用极化/去极化电量差法计算绝缘纸的电导率

3.1 两种方法的比较

为了验证电量差法计算电导率的准确性,文中分别应用两种方法计算获得了油纸绝缘系统的电导率,计算公式分别见式(3)、(12),并将两种方法计算所得的系统电导率和测量所得的电导率的误差进行对比,见表2。

由表2可知,和电导电流法相比,利用极化/去极化电量差法计算系统电导率时误差更小,计算精度更高。这是因为:极化/去极化电量差在一定程度上可以减少噪声干扰,且由式(12)、(13)可知采用电量差法计算电导率时,电导率只与电量差的斜率有关,从图6可以看出4种水分样本的电量差斜率不随时间的变化而变化,而由式(6)可知采用电导电流法计算绝缘纸电导率时,选取的时间为电导电流趋于稳定时的时间,而电导电流为极化/去极化电流之差,极化/去极化电流受到噪声干扰时会小范围内的波动,所以对于电导电流何时趋于稳定存在不确定性。所以采用电量差法求绝缘纸电导率时不受时间选取的约束,电量差法在计算绝缘纸电导率时较电导电流法更有优势。

3.1 绝缘纸电导率的计算

当油纸系统中水分含量增加时,绝缘纸的绝缘

表2 两种方法计算电导率时的误差
Table 2 The error of calculating conductivity by two methods

水分含量/%	测量值/ (10 ⁻¹⁵ S·m ⁻¹)	电导电流法/ (10 ⁻¹⁵ S·m ⁻¹)		电量差法/ (10 ⁻¹⁵ S·m ⁻¹)	
		计算值	误差/%	计算值	误差/%
0.3	1.335	1.467	9.9	1.431	7.2
1.3	2.545	2.219	12.8	2.687	5.6
2.5	3.706	3.256	12.1	4.021	8.5
3.7	7.677	6.947	9.5	8.307	8.2

性能逐渐变差。绝缘纸的电导率可以反映绝缘纸的电导特性,在另一方面也反映了绝缘纸绝缘状态的优劣情况。根据式(13),计算所得的绝缘纸电导率见表3。

表3 采用电量法求绝缘纸的电导率
Table 3 The conductivity of insulation paper is calculated by difference charge method

水分含量 m/%	$\sigma_{\text{paper}}/(10^{-15} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1})$
0.3	0.501
1.3	0.940
2.5	1.407
3.7	2.907

由表3可见,纸的电导率随水分含量的递增呈上升趋势,且随着水分含量的增大,电导率增大的趋势越来越快。这是因为水分作为油纸绝缘的头号杀手,当绝缘纸中的水分含量越多时,极大的破坏了油纸绝缘的绝缘性能,因而绝缘纸的电导率会增大。

3.2 绝缘纸电导率与含水量之间的定量关系

为进一步研究绝缘纸电导率与绝缘纸含水量之间的定量关系,文中对绝缘纸电导率与水分含量采用最小二乘法进行拟合见表4和图7。从表4和图7可知绝缘纸电导率与含水量之间存在拟合度非常高的指数关系。

表4 σ_{paper} 与纸板含水量 m 之间的拟合关系
Table 4 Fitting relationship between σ_{paper} and moisture content of pressboards

拟合公式	R^2
$\sigma_{\text{paper}} = 3.945 \times 10^{-16} \exp(0.3934 \times m) + 5.909 \times 10^{-17} \exp(0.8125 \times m)$	0.993

由图7可见:绝缘纸电导率随纸板含水量的增加呈指数增大。拟合表达式定量地给出了绝缘纸电导率和水分含量之间的关系,这为判断油纸绝缘系统中绝缘纸的绝缘状态提供了新的思路。

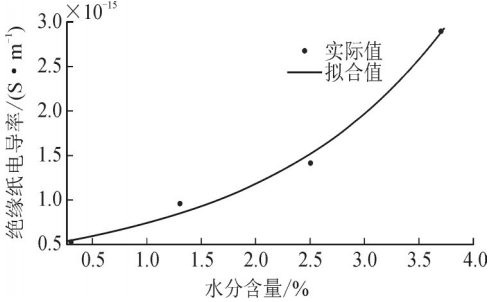


图7 绝缘纸电导率与纸板水分含量之间的关系

Fig. 7 The relationship between conductivity and moisture content of insulating paper

4 结论

对于水分含量不同的油纸绝缘样本,文中采用极化/去极化电量差法对绝缘纸的电导率进行分析,主要得出了以下结论:

1)随着水分含量的增加,纸板中的PDC、电导电流、电量差、电量差斜率逐渐增加。同时绝缘纸电导率也随着水分的增加而递增,这表明绝缘纸的绝缘状态在逐渐劣化。相比电导电流法,电量差法在计算电导率时计算精度更高。

2)通过采用最小二乘法对绝缘纸电导率与纸板水分含量进行拟合,结果表明绝缘纸电导率与水分含量呈指数函数关系,这为量化评估变压器绝缘纸的水分情况提供了新的方法。

参考文献:

[1] 蔡金锭,黄云程. 基于灰色关联诊断模型的电力变压器绝缘老化研究[J]. 高电压技术,2015,41(10):3296-3301.
CAI Jinding, HUANG Yuncheng. Study on the insulation aging of power transformer based on grey relational diagnosis model [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3296-3301.

[2] 李先浪. 基于电介质响应法的油纸绝缘微水扩散特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
LI Xianlang. Research on characteristics of moisture diffusion in oil-paper insulation based on dielectric response[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.

[3] 江修波,黄彦婕,张 涛. 变压器油纸绝缘水分的回复电压分析法[J]. 高电压技术,2010,36(12):2984-2989.
JIANG Xiubo, HUANG Yanjie, ZHANG Tao. Return voltage method of moisture of oil-paper insulation in power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 2984-2989.

[4] KOCH M, KRUGER M, TENBOHLEN S. Comparing various moisture determination methods for power transformers [C]//Cigré 6th Southern Africa Regional Conference. Somerset West, South Africa: [s.n.], 2009: 1-6.

[5] BLENNOW J, GUBANSKI S M. Field experiences with measurements of dielectric response in frequency domain for

- power transformer diagnostics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 21(2): 681-688.
- [6] BAIRD P J, HERMAN H, STEVENS G C, et al. Measurement and analysis of water and oil in transformer insulating paper [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(1): 293-308.
- [7] ZHOU L J, WU G N, LIU J. Modeling of transient moisture equilibrium in oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 872-878.
- [8] SAHA T K, YAO Z T. Experience with return voltage measurements for assessing insulation conditions in service-aged transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 128-135.
- [9] SAHA T K, PURKAIT P. Effects of temperature on time-domain dielectric diagnostics of transformers[J]. Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2004, 1(3): 157-162.
- [10] 王有元, 高 竣, 刘捷丰, 等. 变压器油纸绝缘老化与水分含量评估频域介电特征量[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 215-221.
- WANG Youyuan, GAO Jun, LIU Jiefeng, et al. Aging and water content evaluation of frequency domain dielectric characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 215-221.
- [11] EKANAYAKE C, GUBANSKI S M, GRACZKOWSKI A, et al. Frequency response of oil impregnated pressboard and paper samples for estimating moisture in transformer insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1309-1317.
- [12] 许 渊, 刘有为, 王文焕, 等. 大型电力变压器的油纸绝缘含水量的介质响应诊断技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 133-140.
- XU Yuan, LIU Youwei, WANG Wenhuan, et al. Moisture content analysis of oil - paper insulation for large power transformers using dielectric response methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 133-140.
- [13] 李 洁, 侯英洒, 张 鹏, 等. 电力变压器油纸绝缘的PDC法研究[J]. 自动化仪表, 2015(10): 9-12.
- LI Jie, HOU Yingsa, ZHANG Peng, et al. Study on PDC method for oil paper insulation of power transformer[J]. Automation instrument, 2015(10): 9-12.
- [14] LEIBFRIED T, KACHLER A J. Insulation diagnostics on power transformers using the polarization and depolarization current (PDC) analysis[C]//IEEE International Symposium on Electric Insulation. Boston, USA: IEEE, 2002: 170-173.
- [15] 李 陈, 雷 勇, 周 凯, 等. 极化去极化电流技术用于诊断XLPE电缆绝缘老化状态[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(4): 32-35.
- LI Chen, LEI Yong, ZHOU Kai, et al. Polarization depolarization current technology is used to diagnose the aging state of XLPE cable insulation[J]. New Technology of Electrical and Electrical Energy, 2014, 33(4): 32-35.
- [16] 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.
- [17] SAHA T K, PRADHAN M K, YEW J H. Optimal time selection for the polarisation and depolarisation current measurement for power transformer insulation diagnosis[C]//Power Engineering Society General Meeting. [S.l.]: IEEE, 2007: 1-7.
- [18] 杜清全, 蔡 钢, 黄晓峰, 等. 基于极化去极化的高压套管介电特性研究[J]. 高压电器, 2014, 50(7): 38-43.
- DU Qingquan, CAI Gang, HUANG Xiaofeng, et al. Study on dielectric properties of high voltage bushing based on polarization depolarization[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 38-43.
- [19] 唐 盼. 基于极化去极化电流法的变压器油纸绝缘状态研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- TANG Pan. Study on transformer oil paper insulation based on polarization depolarization current method[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [20] 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 Zhiqin, LIAO Ruijin, HAO Jian, et al. Effect of temperature on polarization depolarization current of oil paper insulation[J]. Proceedings of the Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 290-297.
- [21] 文 华, 马志钦, 王耀龙, 等. 变压器油纸绝缘频域介电谱特性的XY模型仿真及试验研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1956-1964.
- WEN Hua, MA Zhiqin, WANG Yaolong et al. Experimental investigation and XY model simulation on frequency domain dielectric spectrum characteristics of transformer oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1956-1964.
- [22] BLENNOW J, EKANAYAKE C, WALCZAK K, et al. Field experiences with measurements of dielectric response in frequency domain for power transformer diagnostics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 681-688.
- [23] GAFVERT U. Influence of geometric structure and material properties on dielectric frequency response of composite oil cellulose insulation[C]//Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2005: 73-76.
- [24] SAHA T K, PURKAIT P. Investigation of polarization and depolarization current measurements for assessment of oil-paper insulation of aged transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 144-154.
- [25] SILVA H A P, BASSI W, DIOGO A C T. Non-invasive aging assessment by means of polarization and depolarization currents analysis and its correlation with moisture content for power transformer life management[J]. IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition. Latin, America: IEEE, 2004: 611-616.

张 涛(1981—),男,博士,副教授,从事电力系统优化运行、高电压绝缘与测试技术、电力系统过电压与接地技术、电力系统优化运行等方面的工作。