

回复电压极化谱特征量与油纸绝缘变压器微水含量关系分析

林燕桢, 蔡金锭

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 水分是强极性分子, 会改变绝缘介质的弛豫时间, 从而影响变压器的绝缘状态。因此准确诊断变压器中的微水含量, 对分析变压器的老化受潮状态具有重要意义。通过介质响应的回复电压法, 结合现场测试的回复电压极化谱特征量进一步探讨了回复电压极化谱的特征量与油纸绝缘变压器微水含量之间的内在联系, 得出结论: 主时间常数越小, 则变压器的含水量越高; 初始斜率越大, 则变压器的含水量越高; 同时回复电压最大值也会随着水分含量的增加而增大。因此, 可通过分析对比回复电压极化谱特征量来诊断变压器的微水含量, 从而更有效地评估油纸绝缘变压器的老化受潮状态。

关键词: 油纸绝缘; 微水含量; 回复电压; 极化谱特征量; 变压器

Analysis of the relationship between the characteristics of the return voltage polarization spectrum and micro water content of oil-paper insulation transformer

LIN Yan-zhen, CAI Jin-ding

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Moisture is a strong polar molecule, and it could change the relaxation time of dielectric and accordingly affect the state of transformer insulation. So it is of great significance to analyze the transformer's aging and damp condition with the method of diagnosing the micro water content of the transformer accurately. By applying the dielectric response return voltage method, combining with the characteristics of the return voltage polarization spectrum by field test to discuss the relationship between the micro water content and the characteristics of the return voltage polarization spectrum further, we have come up with an conclusion that the smaller the dominant time constant is, the more water the transformer contains; the larger the initial slope is, the more water the transformer contains. At the same time, with the increase of water content in the transformer the maximum value of return voltage will also be increased. So we can diagnose the micro water content of the transformer by analyzing the characteristics of the return voltage polarization spectrum, so as to assess the aging and damp state of oil-paper insulation transformer effectively.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61174117).

Key words: oil-paper insulation; micro water content; return voltage; characteristics of the polarization spectrum; transformer

中图分类号: TM411 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0148-06

0 引言

油纸绝缘变压器是电力系统中的重要主设备, 在电力系统的电压变换、电能分配和传输等环节中都起到核心作用^[1-2], 变压器能否安全运行对电力系统有着非常重要的意义^[3]。若变压器发生故障, 不仅会造成自身与电力系统的重大损害, 同时给经济带来的损失也是不可估量的^[4-5]。无论在何种情况下, 变压器的油纸绝缘系统中都存在着不同含量的水分, 存在的水分会使绝缘介质的介质损耗增大。

同时, 降低其击穿电压, 对绝缘介质的电性能和理化性能将造成很大的危害, 且有可能使油纸绝缘系统受到永久的破坏^[6-7]。

同时投运的同类变压器, 即使在相同的运行条件下, 也可能因水分含量的不同而导致不同的老化受潮程度。因此, 诊断油纸绝缘系统的水分含量有助于更有效地评估变压器的老化受潮状态, 它能够作为变压器维护和状态维修提供重要决策的信息, 从而保证电网安全、稳定、经济地运行^[8-9]。

1 诊断含水量的方法

国内外存在许多诊断油纸绝缘变压器微水含

量的方法, 例如卡尔费休滴定法、油纸水分平衡关系曲线法、露点法等。但是这些方法存在着可能对设备造成绝缘污染或分析数据不易获取等不足之处^[10-12]。

本文将采用介质响应法中的回复电压法来诊断油纸绝缘变压器中的微水含量, 利用回复电压极化谱特征量的变化规律, 分析研究其与油纸绝缘系统微水含量之间的内在联系, 由此来判断油纸绝缘变压器中的微水含量, 该方法克服了传统方法数据不易获取、损伤变压器等缺陷, 系统地分析回复电压极化谱多个特征量与变压器油纸绝缘系统含水量之间的关系, 更全面地研究含水量与油纸绝缘设备老化特性的内在联系, 从而能更精确地评估油纸绝缘变压器的老化受潮状态。

2 介质响应法诊断含水量

介质响应法是研究在电场作用下电介质极化特性的一种方法, 是一种无损诊断绝缘老化受潮状态的方法。可通过分析研究绝缘介质及其老化产物的介电常数之间的内在联系来判断绝缘材料老化受潮状态^[13]。

变压器油纸绝缘系统的绝缘介质主要为绝缘油和绝缘纸。绝缘油为非极性液体, 其介电常数变化很小, 油中溶解水分的极化强度很小, 可忽略不计。绝缘纸的主要成分纤维素为极性分子, 在电场的作用下, 将有大量的偶极子被极化, 吸收特性显著^[8]。因此, 极化强度的贡献主要来自于绝缘纸以及油纸绝缘系统的极性老化产物的转向极化和界面极化, 且水分是主要的极性老化产物。

水分子(H_2O)是由两个氢原子和一个氧原子组成的。三个原子不是分布在一条直线上, 而是分布在一个以氧原子为顶, 底角为 104.5° 的等腰三角形的三个顶点上(如图1所示)。因此, 水分子的正负电荷中心不重合, 其相互作用不能抵消^[14]。因此, 水分的存在会使绝缘介质的极化程度大大增加, 使介电常数增加。由此可见, 水分的存在将在很大程度上影响绝缘介质的极化特性, 同时也会改变绝缘介质的弛豫时间。极化造成的影响可以等值为水分含量, 而水分含量的多少在一定程度上也反映了绝缘系统的老化受潮程度。绝缘系统中的水分含量越多, 绝缘状态越差。因此, 可通过测量介质响应特征量来诊断绝缘系统中的水分含量, 进而评估油纸绝缘变压器的绝缘老化状态。

3 回复电压法简介

回复电压法是一种简便、有效的绝缘检测方法。

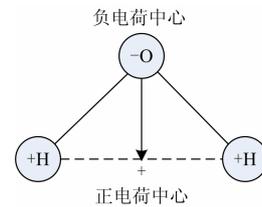


图1 水分子结构图

Fig. 1 Structure of water molecules

回复电压极化谱的整个测量由多个单次测量的循环组成, 每个单次测量循环又分为四个阶段: 充电、放电、测量、松弛^[15](如图2所示)。介质响应的回复电压法获得的特征量主要有: 回复电压峰值 U_{rmax} 、峰值测量时间 t_{peak} 、主时间常数 t_{cdom} 、回复电压初始斜率 dU_r/dt 。

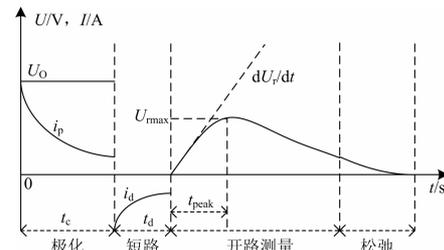


图2 回复电压测试周期的试验阶段

Fig. 2 Pilot phase of return voltage test cycle

4 回复电压极化谱仿真分析

根据回复电压法的测试原理, 利用回复电压测试仪(本文采用的仪器为Tettex公司的RVM 5461自动恢复电压测试仪)对多台油纸绝缘变压器进行现场测试, 并取绝缘油样利用CA-100微水测定仪测试变压器油纸绝缘系统的水分含量(变压器的基本信息见表1、表2)。测试到的回复电压极化谱如图3、图4所示。

表1 变压器T1、T2的基本信息

Table 1 Basic information of transformer T1 and T2

名称	制造年月	型号	电压等级/ kV	水分含量/ %
T1	2000.12	sp-250/10	10	1.631
T2	1995.8	sp-250/10	10	2.984

表2 变压器T3、T4的基本信息

Table 2 Basic information of transformer T3 and T4

名称	制造年月	型号	电压等级/ kV	水分含量/ %
T3	1993.9	SFP9-24000/ 220	220	0.843 2
T4	1993.9	SFP9-24000/ 220	220	0.698 8

注: 变压器T3、T4为同一台变压器检修前后的不同状态, T3为检修前, T4为检修后。

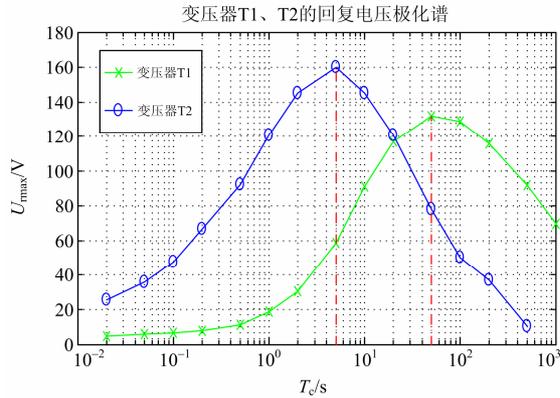


图3 变压器 T1、T2 的回复电压极化谱
Fig. 3 Return voltage polarization spectrum of transformer T1 and T2

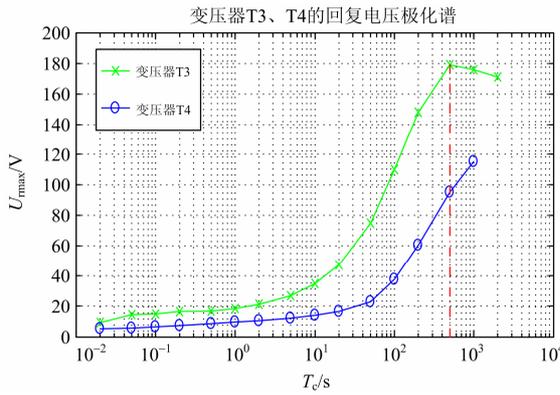


图4 变压器 T3、T4 的回复电压极化谱
Fig. 4 Return voltage polarization spectrum of transformer T3 and T4

由图 3、图 4 可看出，回复电压极化谱曲线会随着油纸绝缘变压器老化受潮状态的不同而变化，回复电压极化谱特征量能够很好地反映出变压器的老化受潮状态。

4.1 主时间常数与含水量的关系

主时间常数反映了绝缘介质极化完全建立的时间，同时也反映了绝缘介质的弛豫时间。水分是强极性分子，会影响油纸绝缘介质的弛豫极化时间，则水分含量的不同将会对主时间常数有着较大的影响，主时间常数是有效诊断油纸绝缘系统微水含量的指标之一。

由图 3、图 4 的对比分析可明显看出，主时间常数越小，则变压器油纸绝缘系统的含水量越高，主时间常数可很好地反应出油纸绝缘变压器的老化受潮状态。

选取了三台相同电压等级的变压器进行现场测试，基本情况见表 3。

表 3 变压器 T5、T6、T7 的基本信息

Table 3 Basic information of transformer T5, T6 and T7

序号	型号	电压等级/kV	出厂日期
T5	SZ10-50000/110	110	2006.10
T6	SZg-31500/110	110	2002.1
T7	SFZ7-31500/110	110	1986.5

将三台变压器的测量数据输入至回复电压测试仪自带的 Tettex SWRVM2.0 软件进行拟合，并将其特征量折算至 20 °C 时的值，确定其在 20 °C 时的主时间常数。将变压器 T5、T6、T7 的水分含量与折算后的主时间常数进行对比分析（如表 4 所示），也可得出，主时间常数越大，则油纸绝缘变压器的微水含量越高，那么变压器的绝缘状态越好。

表 4 变压器 T5、T6、T7 的特征量参数

Table 4 Characteristics parameters of transformer T5, T6 and T7

变压器名	含水量/%	主时间常数/s
T5	0.753 2	1 464.16
T6	0.940 8	999.52
T7	2.611 3	33.37

为了进一步探讨主时间常数与变压器水分含量的关系，在实验室中应用绝缘纸、变压器油、电极、碘量瓶容器、老化箱、若干导线等搭构简易的变压器油纸绝缘模型系统，往干燥的绝缘纸中滴入不同含量的水分，制备出不同水分含量的绝缘纸样，再将不同含水率的绝缘纸样浸入干燥的绝缘油中，经过 12 h 的充分浸泡即可得到已知含水率的油纸绝缘试样，然后应用回复电压测试仪测取主时间常数与水分含量之间的对应关系，如表 5 所示。

表 5 主时间常数与含水量的关系

Table 5 Relationship between dominant time constant and water content

含水量/%	主时间常数/s	含水量/%	主时间常数/s
0.294 18	3 468.57	1.714 69	211.913
0.400 13	3 250.90	1.816 15	161.561
0.501 39	2 318.85	1.907 74	137.525 4
0.599 50	2 016.63	2.012 51	110.086
0.701 97	1 624.65	2.212 30	75.746 3
0.802 26	1 251.45	2.409 65	50.744 8
0.905 29	1 065.77	2.519 34	44.712 5
1.001 35	851.620	2.614 87	33.151 2
1.305 35	477.071	2.718 60	26.094 9
1.408 25	438.591	2.808 67	21.590 7
1.497 79	294.425	2.920 58	19.935 1
1.606 65	243.995	3.018 84	13.783 9

表 5 中所测量到的数据可拟合成主时间常数与油纸绝缘系统含水量关系的曲线, 如图 5 所示。

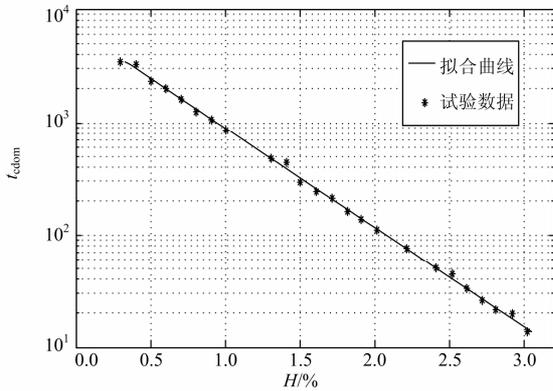


图 5 主时间常数与含水量关系的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of the relationship between dominant time constant and water content

同时, 对表 5 中数据的拟合可得到主时间常数与含水量之间的函数关系表达式为

$$H(t)=4.335-0.4914\ln t \quad (1)$$

式中: t 表示回复电压极化谱中的主时间常数; H 表示油纸绝缘系统中的含水量。由此也可得出, 回复电压极化谱中的主时间常数与变压器油纸绝缘系统中的水分含量成对数关系, 主时间常数越大, 则其水分含量越小。利用主时间常数与水分含量的内在联系, 可以诊断油纸绝缘系统的含水量。

将现场测得的变压器 T5、T6、T7 的主时间常数代入式 (1), 求得这三台变压器的微水含量, 并与表 4 中的数据进行对比分析 (如表 6 所示), 可验证此拟合公式的准确性。因此, 基于回复电压法并利用现场测试的回复电压极化谱特征量 (主时间常数) 可获取变压器油纸绝缘系统的含水量, 从而能更有效地对变压器的老化受潮状态进行评估。

表 6 变压器含水量测量值与计算值的对比

Table 6 Comparison of the measurements and the calculated of transformer water content

变压器名	测量值/%	计算值/%
T5	0.753 2	0.75
T6	0.940 8	0.94
T7	2.611 3	2.61

4.2 回复电压最大值与含水量的关系

从图 3 的两条回复电压极化谱对比可以看出变压器 T1 的回复电压最大值小于 T2 的回复电压最大值, 结合两台变压器的含水量情况 (T1 的水分含量为 1.631%, T2 的水分含量为 2.984%), 可得, 变压器的含水量越高, 其回复电压的最大值越大。为了

更明显地辨析出回复电压最大值与含水量之间的内在联系, 选取了变压器 T3、T4 在不同充电时间下的回复电压最大值进行比较, 如图 6 所示。

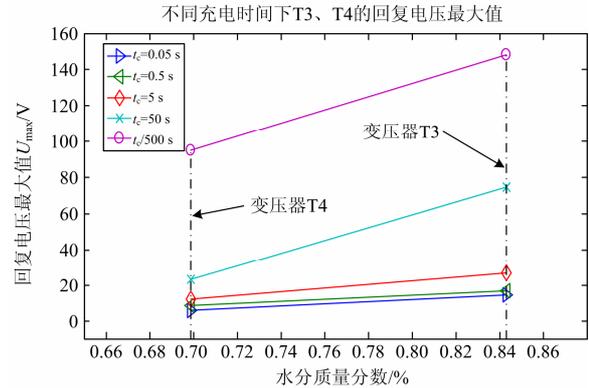


图 6 不同充电时间下回复电压最大值的对比

Fig. 6 Comparison of the maximum value of return voltage in different charging time

图 6 对比了变压器 T3、T4 在不同充电时间下的回复电压最大值, 同时结合两台变压器的微水含量 (由表 2 可知 T3 的水分含量高于 T4), 综合分析比较可得, 含水量高的油纸绝缘变压器的回复电压最大值较大。

4.3 初始斜率与含水量的关系

除了主时间常数之外, 初始斜率也是诊断油纸绝缘变压器老化受潮状态的一个重要指标。初始斜率是回复电压的变化率, 在外加电场恒定时, 其初始斜率越小, 则电导率也越小, 那么变压器的绝缘状态就越好。初始斜率与变压器等值电容的乘积即为变压器的去极化电流, 等值电容的大小不影响初始斜率, 因此可以通过初始斜率来判断油纸绝缘变压器的老化受潮状态。

现通过现场测试的变压器回复电压的特征量来探讨回复电压初始斜率与含水量之间的关系。

图 7 对比了变压器 T3、T4 的回复电压的初始斜率值, 同时结合表 2 中两台变压器的含水量情况, 可得, 回复电压初始斜率越大的变压器的水分含量越高, 这与理论分析的结论是相同的。为了进一步探讨初始斜率与含水量之间的内在联系, 选取了几个不同充电时间下的初始斜率值进行对比分析, 如图 8 所示。

从图 8 可更明显地分析比较出, 回复电压的初始斜率越大, 则变压器的含水量越高, 且在较短充电时间下变化更为明显, 当充电时间大于 50 s, 初始斜率的变化已很微小。由以上分析可知, 通过回复电压的初始斜率也可判断出油纸绝缘变压器的微水含量情况, 初始斜率越大, 则变压器中的水分含

量越高。那么，可将主时间常数与初始斜率结合起来判断油纸绝缘变压器的微水含量情况，从而来进一步评估变压器的老化受潮状态。

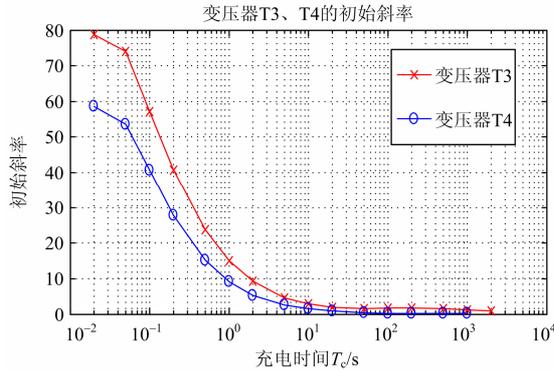


图 7 变压器 T3、T4 的各充电时刻的初始斜率对比

Fig. 7 Comparison of the initial slope in every charging time of transformer T3 and T4

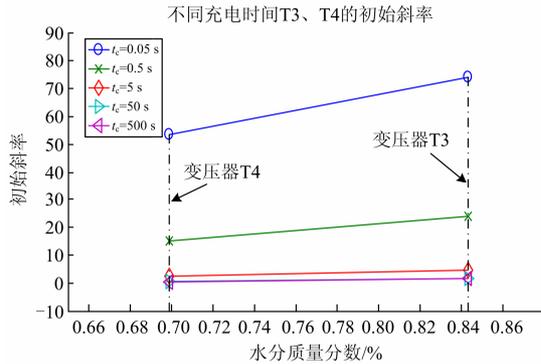


图 8 不同充电时间下变压器初始斜率的对比

Fig. 8 Comparison of the initial slope in different charging time of the transformer

5 结论

本文基于介质响应理论的回复电压法，应用回复电压测试仪现场测试不同绝缘老化状态变压器的回复电压极化谱曲线，将理论分析与现场数据、回复电压极化谱特征量结合起来，探讨研究回复电压极化谱特征量与变压器含水量之间的关系，得出结论：极化谱的主时间常数越小则变压器的水分含量越高；极化谱的初始斜率越大则变压器的水分含量越高；同时，回复电压的最大值会随着变压器中水分含量的提高而增大。基于回复电压极化谱特征量与含水量之间的内在联系，可通过分析研究极化谱特征量的变化规律来诊断油纸绝缘变压器的微水含量。

参考文献

[1] 董立文, 李军, 何宝龙, 等. 水分对油浸式变压器寿命的影响[J]. 变压器, 2008, 45(7): 17-19.

DONG Li-wen, LI Jun, HE Bao-long, et al. Influence of water content on life time of oil-immersed transformer[J]. Transformer, 2008, 45(7): 17-19.

[2] 潘超, 马成廉, 郑玲峰, 等. 一种结合模糊 TOPSIS 法和 BP 神经网络的变压器故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 20-24, 29.

PAN Chao, MA Cheng-lian, ZHENG Ling-feng, et al. A new method based on fuzzy TOPSIS and BP neural network for power transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 20-24, 29.

[3] 项文强, 张华, 王娟, 等. 基于 L-M 算法的 BP 网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 100-103, 111.

XIANG Wen-qiang, ZHANG Hua, WANG Heng, et al. Application of BP neural network with L-M algorithm in power transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 100-103, 111.

[4] 武中利, 杨建, 朱永利, 等. 基于粗糙集理论和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 80-83.

WU Zhong-li, YANG Jian, ZHU Yong-li, et al. Power transformer fault diagnosis based on rough set theory and support vector machines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 80-83.

[5] 王伟, 徐剑峰, 汪鑫, 等. 绝缘纸板的老化对其爬电性能的影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 20-25, 34.

WANG Wei, XU Jian-feng, WANG Xin, et al. Aging effect pressboards on creepage discharge characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 20-25, 34.

[6] CAI Jin-ding, ZHANG Tao. Moisture content assessment of transformer solid insulation using return voltage spectrum[C] // Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin, China: July 19-23, 2009, 257-260.

[7] 屠幼萍, 孙伟忠, 岳彩鹏, 等. 固体绝缘材料热老化电气特性的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 7-13.

TU You-ping, SUN Wei-zhong, YUE Cai-peng, et al. Research on thermal aging electrical properties of polymer materials[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 7-13.

[8] 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 Tao. Research on diagnosis of oil-paper

- insulation condition in transformer based on return voltage characteristic quantities[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2010.
- [9] 廖瑞金, 孙会刚, 尹建国, 等. 水分对油纸绝缘热老化速率及热老化特征参量的影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 34-42.
- LIAO Rui-jin, SUN Hui-gang, YIN Jian-guo, et al. Influence on the thermal aging rate and thermal aging characteristics caused by water content of oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 34-42.
- [10] 黎刚, 李喜桂, 叶会生, 等. 一种新型油浸式变压器绝缘纸板含水量检测方法[J]. 湖南电力, 2012, 32(2): 43-46.
- LI Gang, LI Xi-gui, YE Hui-sheng, et al. A new moisture content measurement method for oil-immersed transformer insulation plate[J]. Hunan Electric Power, 2012, 32(2): 43-46.
- [11] WALCZAK, KRISHTOF, GRACZKOWSKI, et al. Assessment of insulation state of power transformer after 35 years of operation using different diagnostic methods[C] // Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, August 25-28, 2005: 1-6.
- [12] 李燕青, 雍靖, 李菱, 等. 油浸式变压器绝缘含水量检测新方法[J]. 华东电力, 2011, 39(8): 1285-1287.
- LI Yan-qing, YONG Jing, LI Ling, et al. Moisture content measurement for oil-immersed transformer insulation[J]. East China Electric Power, 2011, 39(8): 1285-1287.
- [13] 刘刚. 变压器油-纸绝缘诊断的回复电压法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- LIU Gang. Study on return voltage measurement for diagnosing oil-paper insulation in transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [14] XU S, MIDDLETON R, FETHERSTON F, et al. A comparison of return voltage measurement and frequency domain spectroscopy test on high voltage Insulation[C] // Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, Japan, IEEE, 2003: 351-355.
- [15] ZHANG Tao, CAI Jin-ding, ZHANG Kong-lin. Application of voltage response method for condition assessment of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(12): 2674-2680.

收稿日期: 2013-06-06; 修回日期: 2013-07-20

作者简介:

林燕楨 (1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电气设备绝缘监测与故障诊断; E-mail: lyzlinyanzhen@qq.com

蔡金铤 (1954-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士研究生导师, 长期从事电力系统的教学及人工智能技术在电力工程中的应用研究。