

DOI: 10.7667/PSPC160836

基于回复电压极化谱小波包变换的变压器绝缘老化诊断方法

郭洪英

(福建省送变电工程有限公司, 福建 福州 350013)

摘要: 回复电压法是一种有效的无损时域诊断法。针对回复电压法测量获得的回复电压极化谱隐含了丰富的变压器油纸绝缘老化信息, 提出一种基于小波包变换的回复电压极化谱分析方法。该方法通过小波包3层分解获得回复电压极化谱各个频段的信号分量, 并构建回复电压极化谱的能量特征矢量来分析变压器油纸绝缘老化状态。为验证该方法的可靠性, 通过对2台不同老化状态变压器的回复电压极化谱进行小波包3层分解得到各自的能量特征矢量来分析其绝缘介质老化情况。分析结果表明: 基于小波包分解得到的回复电压极化谱能量特征矢量, 可以有效地诊断变压器油纸绝缘老化状况, 为变压器油纸绝缘老化诊断提供新方法。

关键词: 小波包变换; 回复电压极化谱; 油纸绝缘; 特征值

Diagnostic method of transformer insulation aging based on the recovery voltage polarization spectrum' wavelet packet transform

GUO Hongying

(Fujian Electric Power Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350013, China)

Abstract: The return voltage method is an effective and nondestructive diagnostic method in time domain. In view of the polarization spectrum of the return voltage implying rich aging information of the transformer oil-paper insulation, this paper proposes an analysis method for the return voltage polarization spectrum based on wavelet packet transform. The 3 layer's decomposition of wavelet packet is exploited to obtain the each frequency band of return voltage polarization spectrum, and also the energy feature vector of return voltage polarization spectrum is constructed for analyzing the aging condition of transformer oil-paper insulation. In order to verify the reliability of the method, it uses the energy feature vectors which are obtained by 3 layer's decomposition of wavelet packet of return voltage polarization spectrum of 2 different aging state's transformer to analyze the aging of insulating medium. The analysis results show that the energy feature vector of return voltage polarization spectrum derived from the wavelet packet decomposition method can effectively diagnose the aging condition of transformer oil-paper insulation, which provides a new method for aging diagnosis of transformer insulation.

Key words: wavelet packet transform; return voltage polarization spectrum; oil-paper insulation; feature value

0 引言

大型变压器(尤其是油浸式)处于电力系统的中间关键环节, 一旦其发生故障而停运, 会严重影响电网的安全可靠性^[1-2]。而变压器故障大部分是其内部绝缘老化引起的, 因此, 如何有效评估油纸绝缘变压器内部绝缘老化状态, 已成为一个越来越受重视的研究课题, 一种能准确评估变压器油纸绝缘老化状态的方法对提高电力系统的经济性和安全性具有重要意义^[3-5]。

目前, 研究变压器油纸绝缘老化状态的方法主

要有非电气特征量法和电气特征量法。非电气特征量法有 DGA、DP、油中糠醛分析法等^[6-7], DGA、油中糠醛分析法需对油样进行采样测量, 易受油更换、滤油等油处理的影响, 不能较准确地评估变压器油纸绝缘老化程度; 而 DP 分析法是对固体绝缘纸样进行采样测量, 需要变压器停运、吊罩、取芯, 操作极不方便。所以这些非电气特征量法在电力变压器的绝缘老化评估中也不十分理想。电气特征量法有回复电压法、极化去极化电流法、频域介电谱法^[8-10]等, 这些方法是新型的无损电气诊断法, 无需对变压器进行取样或吊罩等处理, 操作简单,

测试方便。因此电气特征量法被广泛运用于变压器油纸绝缘状态现场评估与研究。

李军浩等人在文献[11]和唐盼等人文献[12]中均利用极化去极化电流曲线特征量来求解扩展德拜等效电路参数；杜振波在文献[13]则利用频域介电谱来研究扩展德拜模型；文献[14]中张军强等人利用回复电压极化谱特征量对等效电路进行研究。

Omar Hassan 等人在文献[15]中分析了不同的微水含量对变压器油纸绝缘状况的影响以及其对回复电压极化谱特征量的变化规律；Saha T K, Purkait P 研究了不同温度对回复电压主时间常数、介质损耗角的影响规律^[16]。虽然上述研究成果表明了利用回复电压极化谱特征量能够在一定程度上有效诊断变压器的绝缘状态，但很少涉及变压器油纸绝缘系统老化产物与回复电压极化谱本身之间的关系。

本文首次提出运用小波包分解方法对回复电压极化谱进行多层次分解，得到多个频段的子谱线，分析其极化谱本身所隐含的老化信息。通过求解回复电压极化谱的能量特征矢量来分析对应绝缘介质老化产物的含量，从而更加有效地诊断变压器油纸绝缘老化情况。

1 回复电压测量原理

回复电压法是利用对绝缘介质进行极化和去极化过程中得到的回复电压曲线特征量来研究其绝缘老化状况。其测量原理是用直流电压源对变压器绝缘介质进行充电，使绝缘介质发生极化反应，经过充电时间 t_c 后，撤去电压源并短接绝缘介质，使其发生去极化反应，最后利用在松弛阶段测量绝缘介质两端的回复电压曲线来分析变压器绝缘老化状态。其测试原理如图 1 所示。

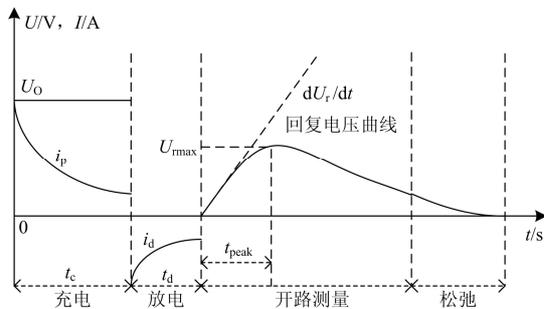


图 1 回复电压测量过程

Fig. 1 Recovery voltage measurement process

2 小波包分析基本理论

小波包变换是小波变换的推广，小波变换将信号分解为代表低频的近似部分和代表高频的细节部分。小波变换只能对每一层的近似部分进行分解，

而小波包变换是同时对每一层的近似部分和细节部分进行再次分解，因而对原始信号的高频部分和低频部分都有更高的分辨率，能够获得更多的信号信息量。小波包变换的分解树示意图和双尺度方程分别如图 2 和式(1)所示。

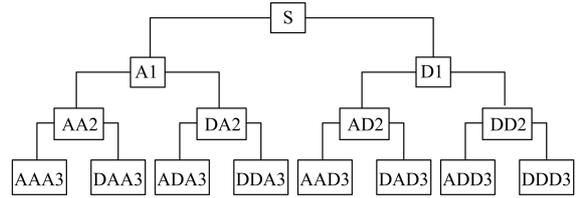


图 2 小波包分解示意图

Fig. 2 Sketch map of wavelet packet decomposition

在图 2 中，A 代表信号 S 的近似分量即低频分量，D 代表信号 S 的细节分量即高频分量，其小标的序号代表小波包分解的层数(即尺度数)。由图 2 可知，小波包分解的层数越多，即小波包所选择的尺度越大，则对信号分解的频段越多。

$$\begin{cases} u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h(k) u_n(2t - k) \\ u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} g(k) u_n(2t - k) \end{cases} \quad (1)$$

式中：当 $n=0$ 时， $u_0(t)$ 为尺度函数 $\phi(t)$ ， $u_1(t)$ 为小波函数 $\varphi(t)$ ，定义函数序列 $\{u_n(t)\}_{n \in Z}$ 为由尺度函数 $\phi(t)$ 所确定的小波包。

小波包分解算法：

$$\begin{cases} C_j^{2n}(k) = \sum_{l \in Z} h(l - 2k) C_{j+1}^n(l) \\ C_j^{2n+1}(k) = \sum_{l \in Z} g(l - 2k) C_{j+1}^n(l) \end{cases} \quad (2)$$

小波包重构算法：

$$C_{j+1}^n(k) = \sum_{l \in Z} h(k - 2l) C_j^{2n}(l) + \sum_{l \in Z} g(k - 2l) C_j^{2n+1}(l) \quad (3)$$

3 利用小波包分解回复电压极化谱

变压器在实际运行过程中，会不断受到电场、磁场、热应力等作用，其绝缘系统会发生水降解和氧化降解产生水、酸、糠醛等老化产物。而这些老化产物的介电常数是不同的，当其发生极化时，各自所呈现的极化响应速度也会有所不同。目前运用回复电压极化谱分析变压器油纸绝缘老化状态都是建立在绝缘系统极化弛豫过程等效为几个不同弛豫速度的弛豫过程线性叠加的前提下，但这种方法不但只能反映整个绝缘系统的时频特性，而且只适用于绝缘老化较轻的变压器，对绝缘老化严重的变压器则会有较大的误差。

水、酸、糠醛等老化产物所对应的弛豫时间不同，而小波包变换分解回复电压极化谱，正好利用小波包变换的高分辨率特性，对极化谱隐含的各弛豫时间不同的弛豫响应进行辨析，即可分析老化产物对极化谱的内在影响。

对回复电压极化谱进行 3 层小波包分解，可以获得第 3 层各个频段子谱线的时域特征，其分解结构图如图 3 所示。

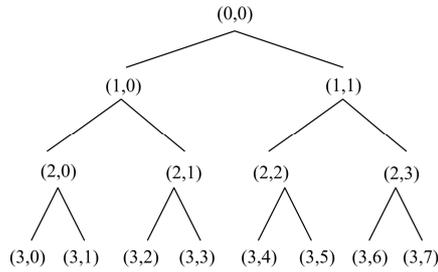


图 3 小波包 3 层分解树结构

Fig. 3 Three grades' tree structure of wavelet packet analysis

图 3 中， (i, j) 表示第 i 层的第 $j+1$ 个节点， $i=1, 2, 3; j=0, 1, \dots, 7$ 。其中，节点 $(0, 0)$ 代表原始信号 S ，节点 $(1, 0)$ 代表小波包分解的第 1 层近似分量即低频分量，节点 $(1, 1)$ 代表小波包分解的第 1 层细节分量即高频分量。每一层的所有节点所对应的频段是一样的长度，且总和等于原始信号的长度。若原始信号的频率为 800 MHz，则节点 $(3, 0), (3, 1), \dots, (3, 7)$ 分别对应 $(0, 100), (200, 300), \dots, (700, 800)$ MHz 频段。

变压器绝缘状态不同，其老化产物的种类和含量也会有所不同，因此各老化产物所对应的弛豫响应对回复电压极化谱的贡献值也不同。本文建立小波包分解的各个频段信号分量的能量值来表征此贡献值，并以各信号分量的能量值为元素构造一个分析油纸绝缘老化产物含量的特征量。

设 E_{ij} 为信号分量 S_{ij} 对应的能量 ($j=0, 1, \dots, 2^i - 1$)，则

$$E_{ij} = \int |S_{ij}(t)|^2 dt = \sum_{m=1}^n |y_{jm}|^2 \quad (4)$$

式中， $y_{jm} (m=1, 2, \dots, n)$ 表示信号 S_{ij} 各个离散点的幅值。

以信号分量归一化能量作为回复电压极化谱信号的特征参数，则基于小波包分析的能量特征提取步骤如下所述。

(1) 对回复电压极化谱信号进行 i 层小波包分解。

(2) 计算第 i 层的各个频段的能量，并对其进行归一化处理，即

$$E_{ij} = \int |S_{ij}(t)|^2 dt = \sum_{m=1}^n |y_{jm}|^2 \quad (5)$$

$$E'_{ij} = \frac{E_{ij}}{\sum_n E_{ij}} \quad (6)$$

式中： E_{ij} 为小波包分解的各个频段能量； E'_{ij} 为对应的归一化能量。

(3) 将上述归一化能量作为回复电压极化谱信号的特征矢量。

$$M = [E'_{i0}, E'_{i1}, \dots, E'_{ij}] \quad (j = 2^i - 1) \quad (7)$$

4 实验结果及分析

为了验证实验结果更具有对比性和可靠性，本文应用回复电压测试仪 RVM 5461 对 2 台老化状态不一样的变压器进行回复电压测试，2 台变压器绝缘情况如表 1 所示，获得其回复电压极化谱如图 4 所示。

表 1 变压器 T₁、T₂ 的绝缘情况

Table 1 Insulation condition of transformer of T₁、T₂

变压器	运行年限	糠醛含量/ (mg/L)	水分含量/ (mg/L)
T ₁	10	0.261	6.6
T ₂	5	0.013	1.6

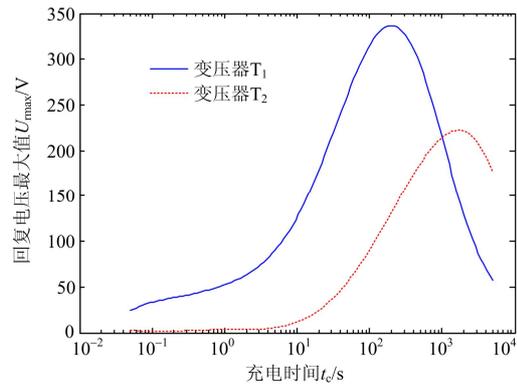


图 4 变压器 T₁、T₂ 的回复电压极化谱

Fig. 4 Return voltage polarization spectrum of transformer of T₁、T₂

从图 4 可以直观地看出极化谱特征量的变化：绝缘状态好的变压器 T₂ 的回复电压极化谱的最大值比绝缘状态差的变压器 T₁ 的小，而主时间常数比变压器 T₁ 的大。但很难判断出是哪种老化产物发生了怎样的变化，从而使得回复电压极化谱发生了变化，导致不能得出准确诊断变压器老化具体情况的有效依据，因此需要研究一个能作为判断依据的老化特征量。

利用上文介绍的小波包分解法,对变压器 T_1 、 T_2 的回复电压极化谱分别进行 3 层小波包分解,并构造出各自的老化特征矢量。变压器 T_1 、 T_2 的各频段分量分别如图 5、图 6 所示。

从图 5、图 6 可以看出,2 台变压器的(3, 0)节点极化谱分量都保持了原始极化谱的绝大部分,为了不影响后面小分量的能量值,本文忽略(3, 0)节点的能量特征值。变压器 T_2 各节点的最大幅值与变压器 T_1 相差不大,但其曲线比变压器 T_1 震荡少。表明了变压器 T_2 绝缘系统老化产物比变压器 T_1 少,会使得老化产物所对应的弛豫响应对极化谱的贡献值减小。通过对各频段分量的能量计算,可以求得小波包变换后变压器 T_1 、 T_2 的能量特征矢量分别为

$$\mathbf{M}_1 = [0.37 \ 0.11 \ 0.38 \ 0.01 \ 0.05 \ 0.07 \ 0.02]$$

$$\mathbf{M}_2 = [0.49 \ 0.10 \ 0.31 \ 0.01 \ 0.03 \ 0.05 \ 0.01]$$

为更加直观地对比两个特征矢量的差别,画出两者柱状图,如图 7 所示。

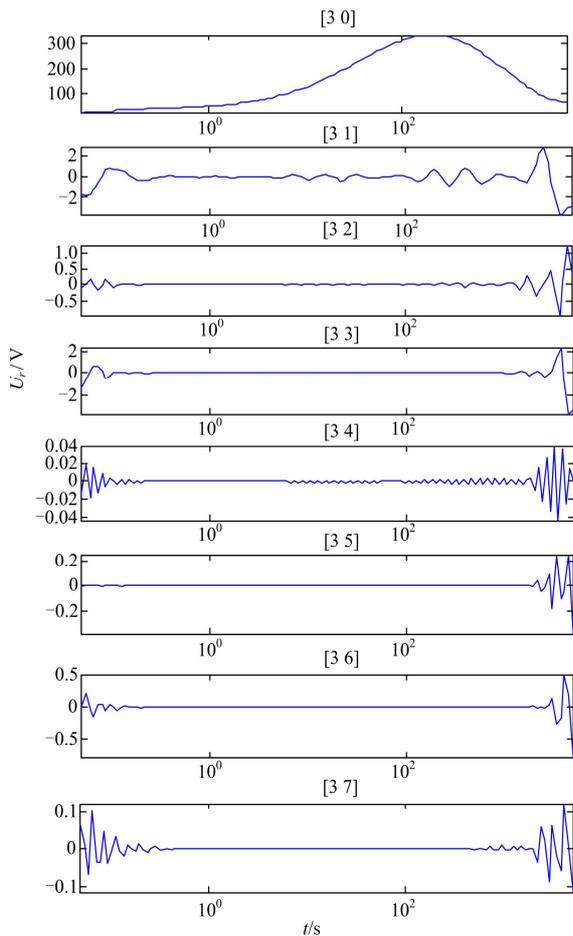


图 5 变压器 T_1 各频段分量

Fig. 5 Each frequency component of transformer T_1

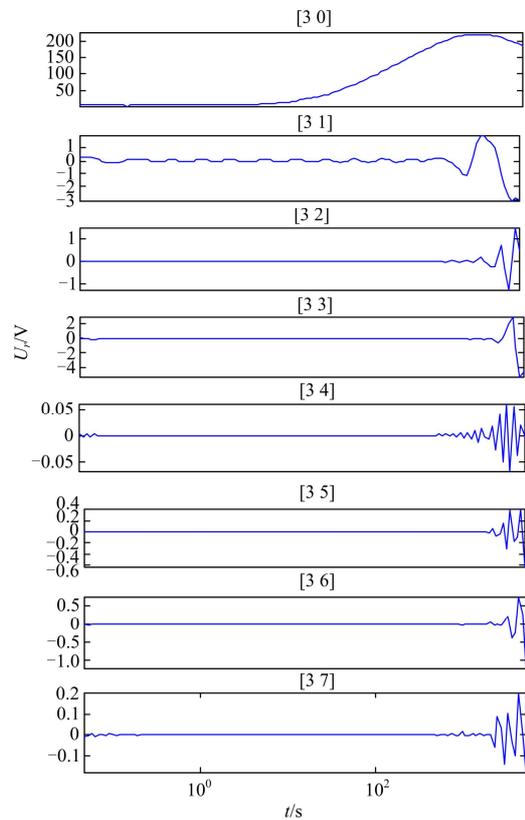


图 6 变压器 T_2 各频段分量

Fig. 6 Each frequency component of transformer T_2

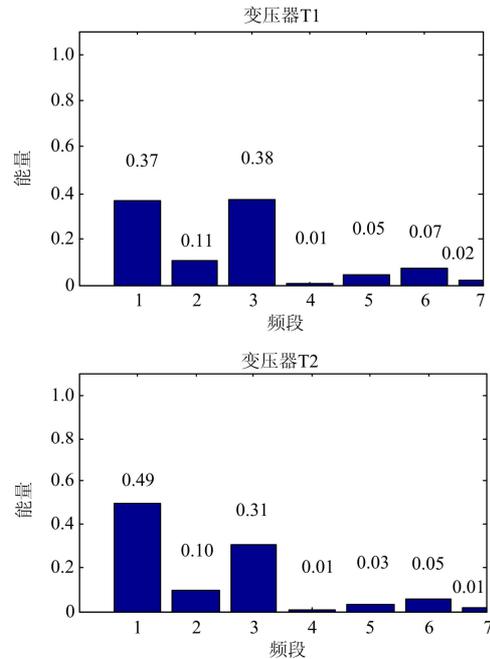


图 7 变压器 T_1 、 T_2 各频段的特征值

Fig. 7 Feature value of each frequency component of transformer T_1 、 T_2

由图 7 可知, 变压器 T_2 的(3, 1)节点极化谱分量的能量值比变压器 T_1 的明显增大, 即变压器 T_2 绝缘介质中的低频分量比变压器 T_1 多, 而变压器绝缘纸在介质响应中属于缓慢弛豫响应, 属于低频分量。从而可知, 变压器 T_2 老化产物糠醛含量低, 其绝缘纸绝缘状态较好。而变压器 T_2 的(3, 3)节点极化谱分量的能量值比变压器 T_1 的明显减小, 且其余的节点极化谱分量的能量值比变压器 T_1 的略小, 即变压器 T_2 绝缘介质中的高频分量比变压器 T_1 少, 而变压器绝缘油和老化产物在介质响应中属于快速弛豫响应, 属于高频分量。从而可知, 变压器 T_2 水分等老化产物含量较低, 其绝缘油绝缘状态较好。由此可见, 运用小波包分解回复电压极化谱可以有效地诊断变压器油纸绝缘系统中绝缘介质的老化状态。

5 结论

本文对回复电压极化谱进行小波包三层分解, 得到第三层各个频段的子谱线, 通过各子谱线的变化情况和小波包能量值来分析绝缘系统老化产物变化情况。研究表明, 变压器油纸绝缘老化严重, 其老化产物的种类和含量都会发生变化, 导致老化产物对应的弛豫响应对极化谱贡献值发生变化。通过小波包分解回复电压极化谱得到各个频段的能量特征值, 可以有效地分析老化产物变化对极化谱的影响情况, 从而为诊断变压器油纸绝缘老化状态提供有力判据。

参考文献

- [1] 边晓燕, 王本利, 陈建平, 等. 改进的 DFIG 与 VSC-HVDC 协调控制改善风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 9-16.
BIAN Xiaoyan, WANG Benli, CHEN Jianping, et al. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using coordinated control of the improved DFIG and VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 9-16.
- [2] 彭积城, 蔡金锭. 变压器油纸绝缘老化状态的探讨[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 132-138.
PENG Jicheng, CAI Jinding. Discussion on evaluation of aging condition for transformer oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 132-138.
- [3] 吴旭涛, 李秀广, 李军浩, 等. 交直流复合电压下油纸绝缘沿面局部放电特性研究[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 128-131.
WU Xutao, LI Xiuguang, LI Junhao, et al. PD characteristics over oil/paper interface stressed by AC and DC composite voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 128-131.
- [4] 魏云冰, 王东晖, 韩立峰, 等. 一种基于 MIA 的油浸式变压器放电性故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 41-47.
WEI Yunbing, WANG Donghui, HAN Lifeng, et al. A novel method for discharging fault diagnosis and location of oil-immersed power transformers based on MIA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 41-47.
- [5] 石鑫, 朱永利, 萨初日拉, 等. 基于深度信念网络的电力变压器故障分类建模[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 71-76.
SHI Xin, ZHU Yongli, SA Churila, et al. Power transformer fault classifying model based on deep belief network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 71-76.
- [6] 张欲晓, 李胜利, 李婷, 等. 变压器油中糠醛浓缩萃取新技术[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1390-1395.
ZHANG Yuxiao, LI Shengli, LI Ting, et al. A new technology to concentrate and extract furfural in transformer oil[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1390-1395.
- [7] 毛知新, 文劲宇. 光声光谱技术在油浸式电气设备故障气体检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 76-82.
MAO Zhixin, WEN Jinyu. Dissolved gas analysis in oil-immersed electrical equipment based on photoacoustic spectroscopy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 76-82.
- [8] 江修波, 黄彦婕, 赖祥生. 改进蚁群算法及其在变压器绝缘介质响应电路参数辨识中的应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1982-1988.
JIANG Xiubo, HUANG Yanjie, LAI Xiangsheng. Improved ant colony algorithm and its application in parameter identification for dielectric response equivalent circuit of transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1982-1988.
- [9] 杨丽君, 齐超亮, 吕彦冬, 等. 热老化时间及测试温度对油纸绝缘时域介电特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 162-169.
YANG Lijun, QI Chaoliang, LÜ Yandong, et al. Study on influences of thermal aging time and testing temperatures on time-domain dielectric characteristics of oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 162-169.
- [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] 李军浩, 胡泉伟, 吴磊, 等. 极化/去极化电流测试技术的仿真研究[J]. 陕西电力, 2011, 39(4): 1-5.
- LI Junhao, HU Quanwei, WU Lei, et al. Simulation study of polarization and depolarization current measurements technology[J]. Shaanxi Electric Power, 2011, 39(4): 1-5.
- [12] 唐盼, 尹毅, 吴建东, 等. 基于去极化电流法的变压器油纸绝缘状态[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(4): 39-42.
- TANG Pan, YIN Yi, WU Jiandong, et al. Study of oil-paper insulated transformers' aging state based on depolarization current measurements[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(4): 39-42.
- [13] 杜振波, 刘诣, 张连星. 基于频域介电谱的变压器油纸绝缘老化机理研究[J]. 电工电气, 2013(12): 6-11.
- DU Zhenbo, LIU Yi, ZHANG Lianxing. Research on transformer oilpaper insulation aging mechanism based on frequency domain spectrum[J]. Electrotechnics Electric, 2013(12): 6-11.
- [14] 张军强, 赵涛, 刘云鹏. 变压器油纸绝缘介质响应等值电路的仿真分析[J]. 绝缘材料, 2013(6): 90-93.
- ZHANG Junqiang, ZHANG Tao, LIU Yunpeng. Equivalent circuit simulation analysis of dielectric response of transformer oil-paper insulation[J]. Insulating Materials, 2013(6): 90-93.
- [15] HASSAN O, BARSİ H, GOCKENBACH E, et al. Diagnostic of insulation condition of oil impregnated paper insulation systems with return voltage measurements[C] // Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003. Annual Report. Conference on. IEEE, 2003: 153-156.
- [16] SAHA T K, PURKAIT P. Investigations of temperature effects on the dielectric response measurements of transformer oil-paper insulation system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 252-260.

收稿日期: 2016-06-07; 修回日期: 2016-09-05

作者简介:

郭洪英(1970-), 男, 通信作者, 硕士, 长期从事超高压电气设备调试、研究工作。E-mail: 13003976060@sina.com

(编辑 魏小丽)