

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.11.005

# 基于连续型回复电压极化谱的油纸绝缘老化研究

林智勇<sup>1,2</sup>, 张波<sup>1,2</sup>, 张达敏<sup>1,2</sup>, 苏若杭<sup>1,2</sup>, 林朝明<sup>3</sup>

(1. 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024; 2. 厦门市高端电力装备及智能控制重点实验室, 福建 厦门 361024; 3. 福建水利电力职业技术学院电力工程学院, 福建 永安 366000)

**摘要:**针对传统的实际测量获取的回复电压极化谱不能准确反映各个充电时间下的回复电压情况并且中心时间常数难以准确判定的问题,提出一种连续型回复电压极化谱的绘制方法。首先对回复电压曲线、绝缘系统等效电路参数之间的关系进行理论分析;然后搭建连续型回复电压极化谱模型,提取更加准确的中心时间常数,并结合中心时间常数与变压器微水含量之间的内在联系判定变压器微水含量;最后对6台不同老化状态下的变压器进行连续型回复电压极化谱分析。研究表明:连续型回复电压极化谱能够更加准确判定中心时间常数,从而有效提高变压器微水含量的判定精度,为准确地反映变压器油纸绝缘老化状态提供新的方法。

**关键词:**油纸绝缘;回复电压;等效电路;极化谱;中心时间常数

中图分类号:TM411

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)11-049-07

## Research on the aging of oil-paper insulation based on continuous return voltage polarization spectrum

LIN Zhiyong<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1,2</sup>, ZHANG Damin<sup>1,2</sup>, SU Ruohang<sup>1,2</sup>, LIN Chaoming<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, P. R. China; 2. Xiamen Key Laboratory of Frontier Electric Power Equipment and Intelligent Control, Xiamen, Fujian 361024, P. R. China; 3. Department of Electrical Engineering, Fujian College of Water Conservancy and Electric Power, Yong'an, Fujian 366000, P. R. China)

**Abstract:** To address the issues of inaccuracies in traditional return voltage polarization spectrum, specifically the inaccurate representation of return voltage at various charging times and the challenge in determining the central time constant precisely, this paper proposes a novel drawing method of the continuous return voltage polarization spectrum. Firstly, this paper analyzes the relationship between the return voltage curve and the equivalent circuit parameters of the insulation system. It then builds a continuous return voltage polarization spectrum model, extracting a more accurate central time constant. By linking this central time constant with the micro-water content of the transformer, the paper establishes an effective method for determining the transformer's micro-water content. Finally, this paper analyzes continuous return voltage polarization spectra using six transformers in different aging states. The results show that this method accurately determines the central time constant,

收稿日期:2023-03-17

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51407151);福建省自然科学基金资助项目(2020J01281)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51407151), and Natural Science Foundation of Fujian Province (2020J01281).

作者简介:林智勇(1989—),男,副教授,博士,主要从事油纸绝缘老化诊断研究,(E-mail)625720199@qq.com。

significantly enhancing the accuracy of micro-water content determination in transformers. This approach offers a new method to accurately assess the aging state of transformer oil-paper insulation.

**Keywords:** oil-paper insulation; return voltage; equivalent circuit; polarization spectrum; central time constant

变压器是电力系统的最重要设备之一,承担着电能的输送和转换的任务<sup>[1]</sup>,其安全可靠运行是电力系统正常工作的重要基础,但变压器故障一直是电力系统事故中的主要原因之一<sup>[2]</sup>。变压器的绝缘老化状态直接影响电网的安全与可靠运行。电场、机械、热场、化学等多种因素的长期影响<sup>[3]</sup>,导致变压器逐渐老化;随着工作年限增加,变压器的老化程度不断加深,其安全性也随之降低<sup>[4]</sup>。变压器绝缘油的老化问题可以通过换油或滤油进行改善,但绝缘纸等固体的绝缘老化是不可逆的。因此,绝缘纸的绝缘状态决定着变压器的运行年限<sup>[5]</sup>。变压器油中的微水含量可以通过定期测量获得,但绝缘纸中的含水量却不易检测,并且油纸绝缘系统中的微水99%都存在于绝缘纸中,因此,获取绝缘纸中的准确微水含量对于诊断变压器的绝缘状态具有重要意义<sup>[6]</sup>。

回复电压法是目前应用于变压器油纸绝缘系统老化状态诊断的重要分析方法之一<sup>[7]</sup>。张涛等<sup>[6]</sup>通过回复电压测试仪采集数据,拟合回复电压极化谱,表明了可通过分析研究极化谱特征量中心时间常数的变化规律诊断油纸绝缘变压器的微水含量。林燕桢等<sup>[8]</sup>研究中心时间常数值大小与变压器绝缘纸中微水含量存在的内在联系,通过中心时间常数推算变压器绝缘纸中的微水含量,从而判定变压器油纸绝缘系统绝缘老化受潮状态。由于目前的传统回复电压极化谱是通过回复电压测试仪测量获得,是几个固定充电时间下的折线图,属于离散稀疏型极化谱,中心时间常数具有不确定性<sup>[9-12]</sup>。中心时间常数的传统判定方法是取回复电压极化谱的峰值,当出现两个相近峰值时取中间值,故对真实的中心时间常数判定有一定误差,难以保证变压器固体绝缘老化状态诊断的准确性。

针对离散稀疏型极化谱难以准确判定中心时间常数的问题,笔者提出构建连续型回复电压极化谱以降低中心时间常数的判定误差。通过扩展德拜等效电路与回复电压解析式的内在联系,建立回复电压模型,并基于回复电压模型多次改变充放电时间,获取不同充电时间下的回复电压曲线,绘制连续型回复电压极化谱,最后准确提取中心时间常数,从而准确评估变压器绝缘纸中的微水含量,为诊断变压器固体绝缘老化提供参考。

## 1 连续型回复电压极化谱绘制

变压器油纸绝缘系统主要由绝缘纸、绝缘油构成<sup>[13-14]</sup>,其绝缘系统的极化弛豫响应通常用图1所示的扩展德拜等效电路模型表征。图1中, $R_g$ 是绝缘系统中的绝缘电阻,主要反映系统中的电导情况; $C_g$ 是绝缘系统的几何电容,反映绝缘系统的绝缘结构<sup>[15]</sup>;极化电阻 $R_{p_i}$ 、极化电容 $C_{p_i}$ 反映着油纸绝缘介质弛豫响应特性,随着油纸绝缘系统老化状态而发生改变<sup>[16]</sup>, $C_{p_i}$ 与 $R_{p_i}$ 乘积 $\tau_i = R_{p_i} C_{p_i}$ 为各支路的时间常数。

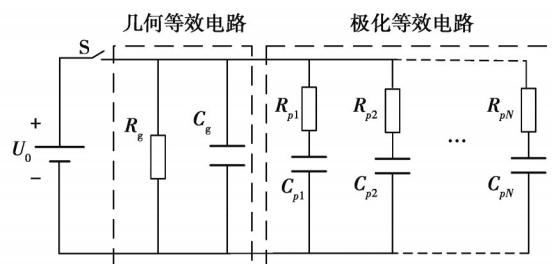


图1 基于扩展德拜模型的介质弛豫响应等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of dielectric relaxation response based on extended Debye model

### 1.1 求解介质弛豫响应等效电路参数

对图 1 电路应用基尔霍夫定律可得方程:

$$C_g \frac{dU_r(t)}{dt} + \frac{U_r(t)}{R_g} + \sum_{i=1}^n C_{pi} \frac{dU_{C_{pi}}(t)}{dt} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{U_r(t) - U_{C_{pi}}(t)}{R_{pi}} = C_{pi} \frac{dU_{C_{pi}}(t)}{dt}, \tag{2}$$

$$U_{C_{pi}}(t) = U_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) e^{-\frac{t+t_d}{\tau_i}}, \tag{3}$$

式中:  $U_r(t)$ 、 $U_{C_{pi}}(t)$  分别为  $t$  时刻电路回复电压值和支路  $i$  单独作用所产生的回复电压值;  $U_0$ 、 $t_c$ 、 $t_d$  分别为回复电压测试时外接直流电源电压值、充电时间和放电时间。

通过整理可得

$$C_g \frac{dU_r(t)}{dt} + \frac{U_r(t)}{R_g} + \sum_{i=1}^n \frac{U_r(t)}{R_{pi}} - \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} \left( e^{-\frac{t+t_d}{\tau_i}} - e^{-\frac{t+t_c+t_d}{\tau_i}} \right) = 0. \tag{4}$$

当  $t=0$  时,  $U_r(t)=0$ 。将多组回复电压测量数据代入式(4),即可组成式(5)。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU_{r1}(t)}{dt} \Big|_{t=0} - \frac{1}{C_g} \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} \left( e^{-\frac{-T_{d1}}{\tau_i}} - e^{-\frac{-(T_{c1}+T_{d1})}{\tau_i}} \right) &= 0 \\ \frac{dU_{rj}(t)}{dt} \Big|_{t=0} - \frac{1}{C_g} \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} \left( e^{-\frac{-T_{dj}}{\tau_i}} - e^{-\frac{-(T_{cj}+T_{dj})}{\tau_i}} \right) &= 0 \\ \frac{dU_{rm}(t)}{dt} \Big|_{t=0} - \frac{1}{C_g} \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} \left( e^{-\frac{-T_{dm}}{\tau_i}} - e^{-\frac{-(T_{cm}+T_{dm})}{\tau_i}} \right) &= 0 \end{aligned} \right\}. \tag{5}$$

式中,  $U_{rj}(t)$ 、 $T_{cj}$ 、 $T_{dj}$  ( $j=1,2,\dots,m$ ) 分别为第  $j$  次回复电压测试时的回路回复电压值、充电时间和放电时间。

由式(5)可建立求解等效电路参数的目标函数  $F(X)$ ,如式(6)所示。将初始斜率  $\frac{dU_r(t)}{dt} \Big|_{t=0}$  带入目标函数即可通过混沌粒子群优化算法求解等效电路中  $C_g$ 、 $C_{pi}$  和  $R_{pi}$  等参数<sup>[13]</sup>。

$$F(X) = \min \left\{ \frac{1}{2n+1} \sum_{j=1}^{2n+1} \left\{ \frac{dU_{rj}(t)}{dt} \Big|_{t=0} - \frac{1}{C_g} \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} \left( e^{-\frac{-T_{dj}}{\tau_i}} - e^{-\frac{-(T_{cj}+T_{dj})}{\tau_i}} \right) \right\}^2 \right\}. \tag{6}$$

### 1.2 连续型回复电压极化谱绘制方法

在上述求解获得的变压器油纸绝缘系统等效电路基础上,结合图 1 中的回复电压测量模型,通过改变充放电时间,获取系列充电时间下的回复电压曲线,提取回复电压峰值  $U_{max}$ ,从而绘制变压器连续型回复电压极化谱,为准确判定中心时间常数  $t_{dom}$  奠定重要依据。

## 2 连续型回复电压极化谱实例分析

### 2.1 变压器 T1 连续型回复电压极化谱绘制

首先对变压器 T1(110 kV, 120 MVA, 纸中微水含量 1.55%) 进行回复电压测量,设置充电电压为 2 000 V,充放电时间比  $t_c/t_d = 2$ ,  $C_g=23.21$  nF,  $R_g=11.28$  GΩ, 获取系列老化特征量初始斜率  $S_r$ 、回复电压最大值  $U_{max}$  和峰值时间  $t_{peak}$ 。再利用前文所述参数辨识方法对变压器 T1 进行等效电路参数辨识<sup>[17]</sup>,辨识结果如表 1 所示。

表 1 变压器 T1 的等效电路参数值

Table 1 Equivalent circuit parameters of transformer T1

极化支路	变压器 T1 中压侧		
	$R_{pi}/G\Omega$	$C_{pi}/nF$	$\tau_i/s$
1	1.549	0.038	0.058 2
2	2.864	0.146	0.418 4
3	3.680	0.746	2.745 0

续表 1

极化支路	变压器 T1 中压侧		
	$R_{pi}/G\Omega$	$C_{pi}/nF$	$\tau_i/s$
4	5.694	4.415	25.130 0
5	2.859	77.860	222.600 0
6	6.057	235.300	1 425.000 0

将表 1 中的参数带入回复电压解析式模型,多次改变充放电时间,记录对应回复电压最大值。变压器 T1 实测回复电压极化谱与连续型回复电压极化谱对比情况如图 2 所示。

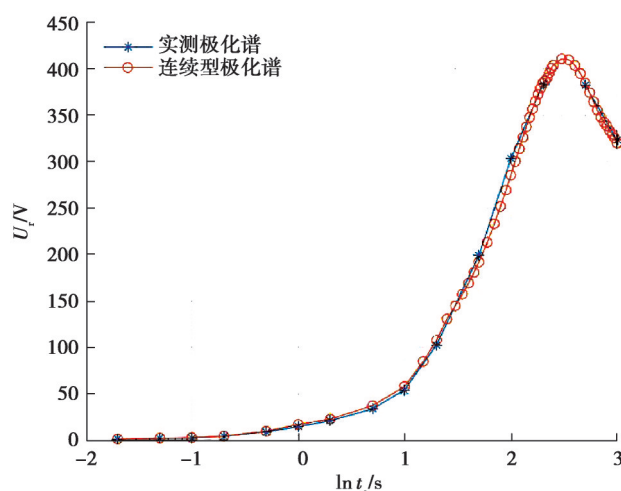


图 2 变压器 T1 实测极化谱与连续型极化谱对比图

Fig. 2 Comparison of measured polarization spectrum and continuous polarization spectrum of transformer T1

## 2.2 变压器 T1 的中心时间常数分析

建立拟合优度来判断实测极化谱与连续型极化谱的重合度,拟合优度  $K$  定义为

$$K = 1 - \frac{\sum y}{\sum y^*} \cdot \frac{|y^* - y|}{y} \quad (7)$$

式中: $y$ 为实际值; $y^*$ 为计算值。当  $K$  越接近 1 时,代表实测极化谱与连续型极化谱的重合度越高。

由图 2 可知,实测离散型回复电压极化谱与连续型回复电压极化谱基本吻合,实测极化谱有两个峰值,连续型极化谱只有一个峰值。通过计算可得两者拟合优度  $K$  为 0.997,进一步验证了连续型回复电压极化谱不但包含了实测离散型回复电压极化谱特征值,也包含了回复电压测试仪在其他充电时间下未能获取的回复电压最大值,有利于准确判定中心时间常数。

由图 2 可知,实测回复电压极化谱出现 200 s 和 500 s 两个回复电压峰值时间,根据传统判定方法,该变压器 T1 中心时间常数为 350 s;连续型回复电压极化谱直接精确判定变压器 T1 的中心时间常数为 300 s,中心时间常数判定精度提高 16.7%。研究表明,中心时间常数与油纸绝缘系统中绝缘纸微水含量之间关系的函数表达式为<sup>[18]</sup>

$$H(t) = 4.335 - 0.4914 \ln t, \quad (8)$$

式中: $H$ 代表油纸绝缘系统中绝缘纸微水含量, $t$ 为在 20 °C 的中心时间常数值。

将传统判定法和精确判定法判定的 2 个中心时间常数带入式(8),可得对应的绝缘纸微水含量分别为 1.456 4%、1.532 2%,而变压器 T1 实际绝缘纸微水含量为 1.55%,绝缘纸微水含量的判定精度提高 4.51%。由此可知,采用连续型回复电压极化谱能够有效提高具有双峰值的回复电压极化谱中心时间常数的判定精度,从而提高变压器绝缘纸微水含量的判定精度,为有效地诊断变压器油纸绝缘老化状态提供新的方法。

### 2.3 变压器 T2 的中心时间常数分析

采用与 2.1 中同样的方法对变压器 T2 (110 kV, 31.5 MVA, 纸中微水含量 1.60%,  $C_g=78.79$  nF,  $R_g=1.52$  G $\Omega$ ) 进行回复电压测量和等效电路辨识<sup>[17]</sup>, 可得变压器 T2 等效电路参数值(表 2)。

表 2 变压器 T2 的等效电路参数值

Table 2 Equivalent circuit parameters of transformer T2

极化支路	变压器 T2 中压侧		
	$R_{p_i}/G\Omega$	$C_{p_i}/nF$	$\tau_i/s$
1	0.097	2.581	0.251 3
2	0.266	4.635	1.232 0
3	0.681	11.820	8.050 0
4	0.611	67.930	41.510 0
5	0.724	310.100	224.600 0
6	2.555	473.900	1 210.800 0

变压器 T2 实测回复电压极化谱与连续型回复电压极化谱对比情况如图 3 所示。

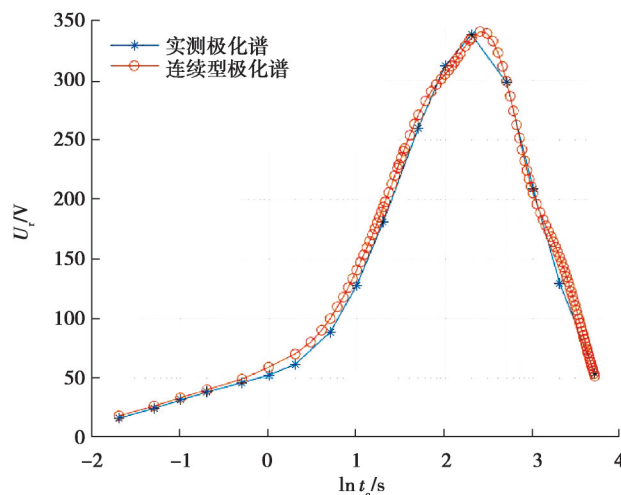


图 3 变压器 T2 实测极化谱与连续型极化谱对比图

Fig. 3 Comparison of measured polarization spectrum and continuous polarization spectrum of transformer T2

由图 3 可知, 实测回复电压极化谱曲线与连续型回复电压极化谱曲线基本吻合, 拟合优度  $K$  为 0.964 7, 证明了该连续型回复电压极化谱能够较全面地反映变压器 T2 的油纸绝缘状态。变压器 T2 实测回复电压极化谱只有一个峰值, 根据传统判定法其中心时间常数为 200 s, 连续型回复电压极化谱可精确判定变压器 T2 的中心时间常数为 250 s, 中心时间常数判定精度提高 20%。将传统判定法和精确判定法判定的 2 个中心时间常数带入式(8), 可得对应的绝缘纸微水含量分别为 1.73%、1.62%, 而变压器 T2 实际绝缘纸微水含量为 1.60%, 精确判定法的判定精度提高 6.88%; 由此可知, 采用连续型回复电压极化谱也能够有效提高具有唯一峰值的回复电压极化谱中心时间常数的判定精度。

### 2.4 变压器 T2 的中心时间常数分析

为了进一步验证提出的连续型回复电压极化谱能准确判定油纸绝缘变压器的绝缘纸微水含量, 现对 6 台不同老化程度的变压器进行绝缘纸微水含量的分析, 并计算了相关误差, 结果见表 3。传统回复电压极化谱与连续型回复电压极化谱微水含量判定误差表达式分别为:

$$W^* = \frac{|H^* - H|}{H}, \quad (9)$$

$$W^a = \frac{|H^a - H|}{H}. \quad (10)$$

式中： $H^*$ 代表传统回复电压极化谱计算绝缘纸微水含量； $H^a$ 代表连续型回复电压极化谱计算绝缘纸微水含量。

表3 多台变压器绝缘纸微水含量分析

Table 3 Micro water content analysis of multiple transformers

变压器	传统回复电压极化谱 $t_{\text{dom}}$	连续型回复电压极化谱 $t_{\text{dom}}$	$t_{\text{dom}}$ 提高精度/%	$H^*/\%$	$H^a/\%$	$H/\%$	$W^*/\%$	$W^a/\%$
T1	350	300	16.67	1.46	1.53	1.55	5.80	1.29
T2	200	250	20.00	1.73	1.62	1.60	8.13	1.25
T3	2 000	2 100	4.76	0.60	0.58	0.56	7.14	3.57
T4	500	600	16.67	1.28	1.19	1.17	9.40	1.71
T5	50	42	19.05	2.41	2.50	2.49	3.21	0.40
T6	1 000	1 210	17.36	0.94	0.85	0.87	8.04	2.30

由表3可知,采用连续型回复电压极化谱能够有效提高回复电压极化谱中心时间常数的判定精度,特别是对于  $t_{\text{dom}} < 1\ 300$  s时,精度提高均超过15%,对后续利用中心时间常数判定变压器老化状态具有重要意义。另一方面,采用连续型回复电压极化谱也能够有效提高变压器油纸绝缘系统微水含量的判定精度,特别是对于微水含量低于2%的变压器,判定精度提高效果更显著。综上所述,采用连续型回复电压极化谱能够有效提高不同类型回复电压极化谱中心时间常数的判定精度,从而提高判定变压器绝缘系统微水含量的可靠性,为有效判定变压器油纸绝缘老化状态提供新的方法。

### 3 结 论

回复电压极化谱是利用回复电压特征量诊断变压器油纸绝缘老化的重要依据,而回复电压特征量主要从回复电压极化谱获取。因此,回复电压极化谱的准确性会影响变压器油纸绝缘老化诊断结果的可靠性。笔者利用变压器等效电路参数构建回复电压函数表达式和模型,通过改变系列充电时间,获取对应回复电压最大值,从而建立连续型回复电压极化谱。研究表明,连续型回复电压极化谱与实际测量的传统折线型回复电压极化谱具有良好的拟合优度,对回复电压极化谱中心时间常数判定精度有显著提高,从而提升变压器绝缘纸微水含量的判定精度,为可靠地诊断变压器绝缘老化状态提供新的方法。

### 参考文献

- [1] 熊小伏. 电气设备主动保护与控制概念及功能架构[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 1-10, 49.  
Xiong X F. Conception and architecture of pro-active protection and control for power equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 1-10, 49.(in Chinese)
- [2] 范贤浩, 刘捷丰, 张懿议, 等. 融合频域介电谱及支持向量机的变压器油浸纸绝缘老化状态评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(10): 2161-2168.  
Fan X H, Liu J F, Zhang Y Y, et al. Aging evaluation of transformer oil-immersed insulation combining frequency domain spectroscopy and support vector machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(10): 2161-2168.(in Chinese)
- [3] 杜伯学, 朱闻博, 李进, 等. 换流变压器阀侧套管油纸绝缘研究现状[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1300-1309.  
Du B X, Zhu W B, Li J, et al. Research status of oil-paper insulation for valve side bushing of converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1300-1309.(in Chinese)
- [4] 王健一, 刘雪丽, 孙建涛, 等. 油纸绝缘新型老化表征物研究进展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7517-7529.  
Wang J Y, Liu X L, Sun J T, et al. Research progress and prospect of new aging characterization of oil-paper insulation[J].

- Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7517-7529.(in Chinese)
- [ 5 ] 林智勇, 张达敏, 黄国泰, 等. 基于极化等效电路时间常数的油纸绝缘变压器微水含量评估[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(12): 113-119.  
Lin Z Y, Zhang D M, Huang G T, et al. Study on moisture content in the oil-paper insulation transformer based on time constant of polarization equivalent circuit[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(12): 113-119.(in Chinese)
- [ 6 ] 张涛, 左倩, 任乔林, 等. 油纸绝缘非标准极化谱的中心时间常数提取[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(8): 82-88.  
Zhang T, Zuo Q, Ren Q L, et al. Central time constant of nonstandard polarization spectrum of oil-paper insulation[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(8): 82-88.(in Chinese)
- [ 7 ] Šimko M. Measuring and diagnostic system for analysis of transformer insulation by return voltage method[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2020, 1(12): 69-72.
- [ 8 ] 林燕桢, 蔡金锭. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 148-153.  
Lin Y Z, Cai J D. Analysis of the relationship between the characteristics of the return voltage polarization spectrum and micro water content of oil-paper insulation transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 148-153.(in Chinese)
- [ 9 ] 刘捷丰, 张懿议, 徐建建, 等. 扩展 Debye 模型大时间常数与变压器油纸绝缘老化的定量关系研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 197-202.  
Liu J F, Zhang Y Y, Xu J J, et al. Quantitative relationship between aging condition of transformer oil-paper insulation and large time constant of extend Debye model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 197-202.(in Chinese)
- [ 10 ] Wolny S. Aging degree evaluation for paper-oil insulation using the recovery voltage method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2455-2462.
- [ 11 ] 许梦素, 莫付江, 陈惠, 等. 基于回复电压法的变压器油纸绝缘状况的等效仿真分析[J]. 绝缘材料, 2018, 51(1): 70-74.  
Xu M S, Mo F J, Chen H, et al. Ageing condition equivalent simulation of transformer oil-paper insulation based on recovery voltage method[J]. Insulating Materials, 2018, 51(1): 70-74.(in Chinese)
- [ 12 ] Yang L J, Zou T T, Deng B F, et al. Assessment of oil-paper insulation aging using frequency domain spectroscopy and moisture equilibrium curves[J]. IEEE Access, 2019, 7: 45670-45678.
- [ 13 ] 王健一, 刘雪丽, 孙建涛, 等. 油纸绝缘新型老化表征物研究进展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7517-7529.  
Wang J Y, Liu X L, Sun J T, et al. Research progress and prospect of new aging characterization of oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7517-7529.(in Chinese)
- [ 14 ] 杨定坤, 陈伟根, 万福, 等. 基于绝缘油拉曼光谱的聚合度定量评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4710-4720.  
Yang D K, Chen W G, Wan F, et al. Quantitative evaluation method of degree of polymerization based on Raman spectra of insulating oil[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4710-4720.(in Chinese)
- [ 15 ] Xia G Q, Wu G N, Gao B, et al. A new method for evaluating moisture content and aging degree of transformer oil-paper insulation based on frequency domain spectroscopy[J]. Energies, 2017, 10(8): 1195.
- [ 16 ] 林智勇, 仲训果, 曾汉超, 等. 基于去极化电流特征量的油纸绝缘变压器等效电路参数辨识[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(1): 87-94.  
Lin Z Y, Zhong X G, Zeng H C, et al. Parameter identification of oil-paper insulation transformer equivalent circuit based on depolarization current characteristics[J]. Journal of Chongqing University, 2022, 45(1): 87-94.(in Chinese)
- [ 17 ] 林智勇. 基于弛豫响应等效电路方法的油纸绝缘老化诊断研究[D]. 福州: 福州大学, 2015.  
Lin Z Y. Study on diagnosis of oil-paper insulation aging based on relaxation response equivalent circuit method[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2015.
- [ 18 ] 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 T. Research on diagnosis of oil-paper insulation condition in transformer based on return voltage characteristic quantities[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2010.

(编辑 吕建斌)