

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2022.227

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

林智勇, 仲训杲, 曾汉超, 张强, 郑运鸿

(厦门理工学院 电气工程与自动化学院, 厦门 361024)

摘要: 变压器扩展德拜等效电路是分析变压器绝缘老化情况的重要途径, 针对变压器等效电路极化支路数及其参数求解难的问题, 根据电介质极化响应理论, 提出去极化电流时域微分解谱法, 分解去极化电流曲线中各个子谱线组成部分, 并根据子谱线参数判定等效电路极化支路数和辨识等效电路参数, 为构建准确反映变压器油纸绝缘状态的等效电路提供可靠而简便的方法, 并通过与其他辨识方法进行对比, 验证文中方法的有效性, 从而为准确评估变压器绝缘状态提供重要依据。

关键词: 去极化电流; 变压器; 等效电路; 参数辨识

中图分类号: TM411

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2022)01-087-08

Parameter identification of oil-paper insulation transformer equivalent circuit based on depolarization current characteristics

LIN Zhiyong, ZHONG Xungao, ZENG Hanchao, ZHANG Qiang, ZHENG Yunhong

(College of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology,
Xiamen 361024, P. R. China)

Abstract: Extended Debye equivalent circuit of transformer is an important way to analyze insulation aging of transformers. To address the problem of solving the number of polarization branches and the parameters of transformer equivalent circuit, this paper proposes the depolarization current time domain micro-decomposition spectrum method according to the theory of dielectric polarization response. This method first decomposes the components of each sub-line in the depolarization current curve to determine the number of polarization branches and then identifies the equivalent circuit parameters according to the parameters of the sub-spectral lines. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by comparing it with other identification methods. The proposed method provides a reliable and simple method

收稿日期: 2019-08-28 **网络出版日期:** 2019-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61703356); 福建省自然科学基金资助项目(2018J05114); 福建省科技厅引导性资助项目(2019H0039); 福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT170425); 厦门理工学院“科研攀登计划”资助项目(XPDKQ18020)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (61703356), Natural Science Foundation of Fujian Province, China (2018J05114), Science and Technology Department guiding Project of Fujian Province, China (2019H0039); Education Department Middle-aged and Young Teachers Education and Scientific Research Project of Fujian Province, China (JAT170425), “Scientific Research climbing Plan” of Xiamen University of Technology (XPDKQ18020).

作者简介: 林智勇(1989—), 男, 博士, 主要从事电气设备绝缘监测与故障诊断研究, (E-mail)625720199@qq.com。

for the construction of the equivalent circuit which accurately reflects the oil-paper insulation condition of transformer and further provides an important basis for the accurate evaluation of transformer insulation.

Keywords: depolarization current; transformer; equivalent circuit; parameter identification

变压器运行过程中,其绝缘纸、绝缘油等绝缘介质会受到外部环境的影响而发生老化,从而影响变压器的绝缘性能^[1-2]。变压器绝缘性能下降主要是由于内部老化反应改变了绝缘介质的介电特性。目前国内外学者主要通过绝缘系统等效电路理论来研究变压器绝缘介质的介电特性变化情况^[3-4]。文献[5]根据扩展德拜等效电路,提出极化支路的平均弛豫时间常数新特征量,并通过系列变压器等效电路参数来研究平均弛豫时间常数对变压器绝缘老化的变化规律,构建量化诊断油纸绝缘变压器老化状态的新方法;文献[6]在变压器扩展德拜等效电路基础上,通过改变等效电路参数仿真分析回复电压最大值和主时间常数与变压器绝缘老化的内在联系;文献[7]对现有变压器等效电路参数辨识方法进行分析,然后利用改进粒子群算法辨识其参数,加快算法收敛速度和提高辨识精度;文献[8]通过改变变压器等效电路中绝缘电阻和几何电容以及极化支路参数来仿真分析回复电压极化谱的变化情况,从而进一步分析变压器绝缘老化机理和变化规律。

这些方法主要通过测试获得的回复电压特征量并结合粒子群等智能算法来求解等效电路参数,辨识方法科学合理、可靠性较好,但由于其目标函数比较复杂,影响收敛性,而且变压器等效电路的极化支路数都是事先假定,没有根据变压器实际老化情况而变化,造成其运用的局限性^[9-11]。通过详细分析去极化电流的内在组成部分,研究其隐含的去极化电流特征量与等效电路参数之间的内在联系,提出辨识等效电路参数的新方法,提高参数辨识的精确度,为评估油纸绝缘变压器的老化状态提供重要依据。

1 变压器等效电路模型

扩展德拜等效电路是目前应用最广泛的变压器等效电路模型^[12-14],其结构如图 1 所示。由图 1 可知,等效电路由几何等效电路和极化等效电路两部分组成,其中几何等效电路由绝缘电阻 R_g 和几何电容 C_g 组成,极化等效电路由多个极化电阻 R_{pi} 和极化电容 C_{pi} 串联支路并联组成(其乘积 $\tau_i = R_{pi}C_{pi}$ 为各极化支路的时间常数,它表征绝缘介质在充放电过程中的弛豫响应速度)。

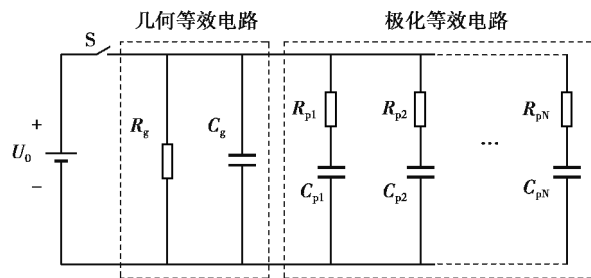


图 1 扩展德拜等效电路

Fig. 1 Schematic diagram of the extended Debye equivalent circuit

运用等效电路分析变压器绝缘老化情况,关键在于构建能够准确反映变压器绝缘老化的等效电路^[10]。国内外学者一般是根据经验值直接假定等效电路极化支路数,然后运用智能算法辨识等效电路参数。而假定法具有主观性,智能算法也存在一定的辨识误差,都会影响等效电路参数的准确性。针对这 2 个问题,通过分析去极化电路曲线与各极化支路参数的内在联系,运用微分解谱法判定极化支路数,再根据谱线参数直接辨识等效电路参数,提高利用等效电路参数诊断变压器绝缘状态的可靠性。

2 去极化电流微分解谱

研究采用自行设计的 PDC 测试仪(由 Keithley6517A 表和计算机构成的自动测试组成)对变压器进行去极化电流测试,首先对变压器绕组两端接上 U_0 的直流电压源进行充电,经过一段时间后,将电源移除并短接变压器绕组两端,此时流过短接线的电流即为去极化电流^[14]。去极化电流是变压器绝缘系统在去极化过程中绝缘介质两端之间的总电流,根据电路理论,图 1 所示的等效电路去极化电流 i_d 是等效电路各个极化支路弛豫过程的叠加,去极化电流^[15]可表示为

$$i_d = -C_0 U_0 \sum_{i=1}^n A_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} = - \sum_{i=1}^n B_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (1)$$

式中: C_0 为真空电容值;比例系数 $B_i = C_0 U_0 A_i$, $B_i = (1 - e^{-t_c/\tau_i})/R_i$; t_c 为极化充电时间; n 为等效电路极化支路数。

现对 i_d 进一步变换,可得去极化电流的时域微分函数:

$$\phi(t) = t \frac{di_d}{dt} = B_i \sum_{i=1}^n \frac{t}{\tau_i} e^{-\frac{t}{\tau_i}} = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\tau_i, t), \quad (2)$$

式中, $\varphi_i(\tau_i, t) = B_i \frac{t}{\tau_i} e^{-\frac{t}{\tau_i}}$ 为去极化电流的时域微分子函数。

为进一步研究函数 $\varphi_i(\tau_i, t)$ 的特性,现取 $f_1(t) = \varphi_i(\tau_i, t)$, $f_2(t) = \varphi_i(\tau_i/3, t)$ 作比较,比较结果如图 2 所示。

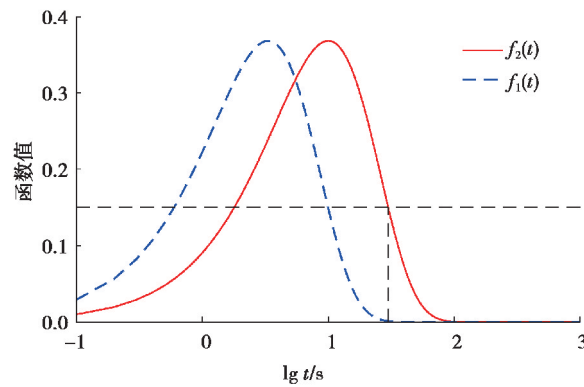


图 2 2 函数比较结果图

Fig. 2 Comparison result of two functions

由图 2 可知:① $t < \tau_i$ 时, $\varphi_i(\tau_i, t)$ 单调递增;② $t > \tau_i$ 时, $\varphi_i(\tau_i, t)$ 单调递减;③ $t = \tau_i$ 时, $\varphi_i(\tau_i, t)$ 具有唯一的最大值 $\frac{B_i}{e}$, 并向两端迅速衰减至 0; 且当 $t = 30$ s, $\tau_i = 10$ 时, $f_1(t) = 0.73\% f_2(t)$ ($f_2(t)$ 为大时间常数谱线, $f_1(t)$ 为小时间常数谱线); 所以 $f_1(t)$ 谱线对 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 叠加后的谱线末端影响可忽略不计。因此,可以通过对去极化电流的时域微分谱线末端进行逐次解谱获得各个时域微分子谱线参数。

根据函数 $\varphi_i(\tau_i, t)$ 的特性,去极化电流时域微分谱线解谱步骤如下:

1) 对 i_d 进行变换获得对应的时域微分谱线 $\phi(t)$;

2) 从 $\phi(t)$ 末端任取 2 点 $(t_1, \phi(t_1))$, $(t_2, \phi(t_2))$, 然后联立式(3), 可求得第 1 条子谱线 $L_1(t)$ 的参数 (B_1, τ_1) ,

$$\begin{cases} \phi(t_1) = B_1 \frac{t_1}{\tau_1} e^{-\frac{t_1}{\tau_1}}, \\ \phi(t_2) = B_1 \frac{t_2}{\tau_1} e^{-\frac{t_2}{\tau_1}}; \end{cases} \quad (3)$$

3) 将 $\phi(t)$ 减去第 1 条子谱线 $L_1(t)$ 获得剩余时域微分谱线 $\phi_1(t)$, 继续在 $\phi_1(t)$ 末端取 2 点 $(t_3, \phi(t_3))$,

$(t_4, \psi(t_4))$, 然后联立式(4), 可求得第 2 条子谱线 $L_2(t)$ 的参数 (B_2, τ_2) ,

$$\begin{cases} \psi(t_3) = B_2 \frac{t_3}{\tau_2} e^{-\frac{t_3}{\tau_2}}, \\ \psi(t_4) = B_2 \frac{t_4}{\tau_2} e^{-\frac{t_4}{\tau_2}}; \end{cases} \quad (4)$$

4) 重复步骤(2)~(3), 直至 n 条子谱线全部分解完毕, 即求得等效电路的极化支路数 n 。

3 等效电路参数辨识

研究利用 1 台刚投入运行绝缘状态良好的变压器(型号为 SFP9-240000/220)在充电时间为 1 000 s 时的去极化电流曲线, 详细分析其时域微分解谱过程, 解谱结果如图 3 所示。

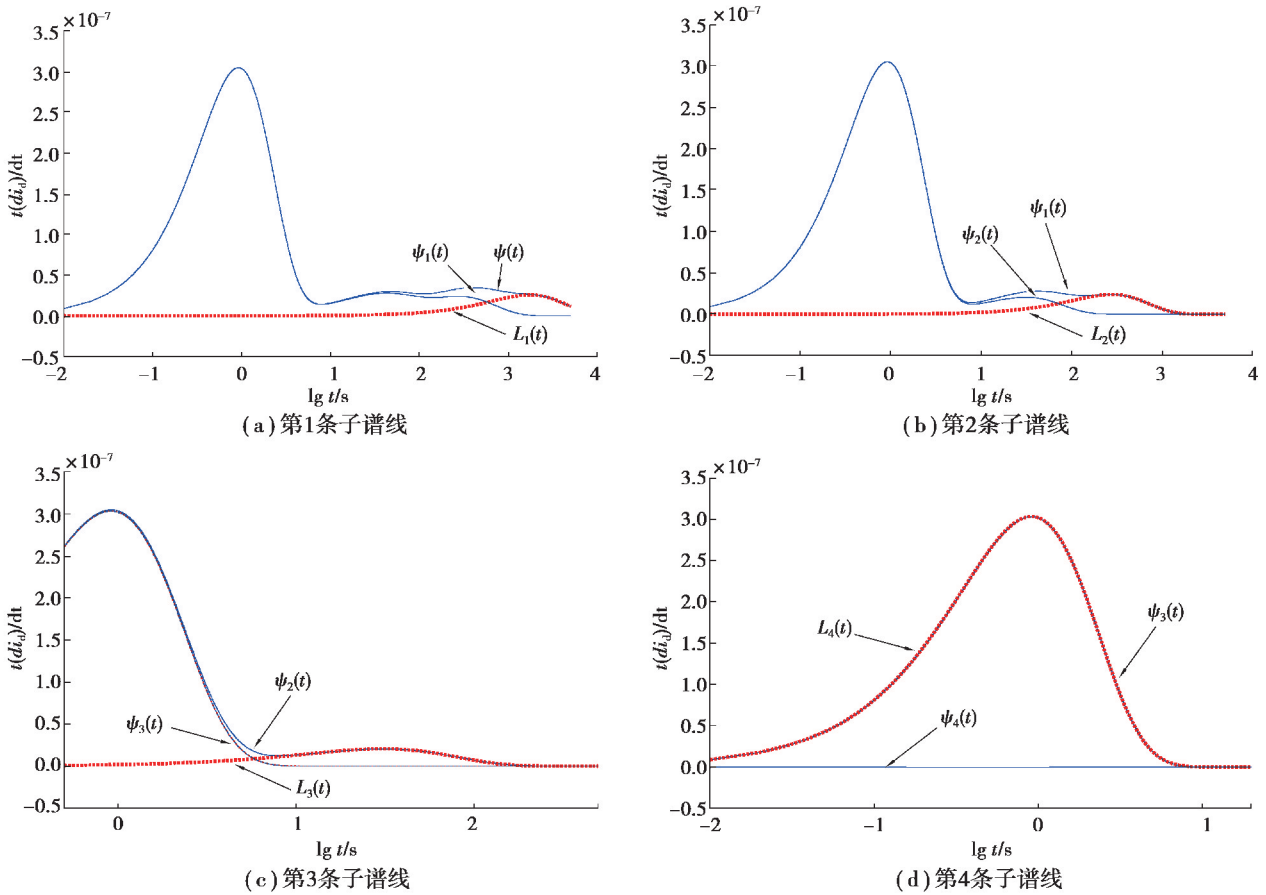


图 3 解谱过程图

Fig. 3 Diagram of decomposing process

从图 3 可知, 去极化电流时域微分解谱法能够准确地分解去极化电流曲线内部各个子谱线, 同时计算反映等效电路各个极化支路弛豫特性的子谱线参数。变压器各个子谱线参数如表 1 所示。

表 1 微分解谱得到的各条子谱线参数

Table 1 The sub-spectrum's parameters of the transformer

时域微分子谱线	τ_i/s	$B_i/10^{-8}$
1	1 755.500 0	7.001 9
2	277.691 8	6.487 5
3	30.967 5	5.604 5
4	0.911 1	82.575 0

将表 1 中各子谱线参数带入式(1),求得对应的去极化电流曲线,并与原去极化电流曲线进行比较,比较结果如图 4 所示。

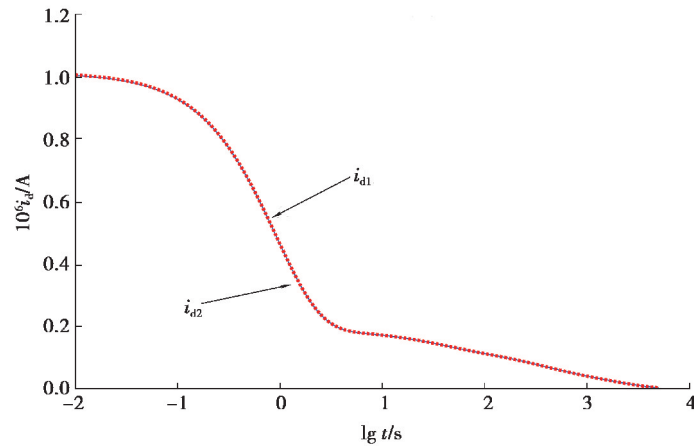


图 4 求解与测试的去极化电流比较图

Fig. 4 Comparison diagram of depolarization current curves obtained by solved and tested

由图 4 可知,2 种去极化电流曲线基本吻合,通过计算其拟合优度为 0.992,进一步验证了文中所提解谱方法的可靠性和有效性,能够准确地分解反映各极化支路极化特性的子谱线,为后续的绝缘介质状态评估提供重要依据。

根据表 1 的各条子谱线参数,并结合上文等效电路参数与子谱线参数之间的关系式(1),可以求得变压器 T1 等效电路参数值,如表 2 所示。

表 2 变压器 T1 等效电路参数值

Table 2 Equivalent circuit parameters of transformer T1

极化支路	τ_i/s	$R_i/G\Omega$	C_i/nF
1	1 755.500 0	28.619	61.419
2	277.691 8	30.892	9.034
3	30.967 5	35.884	0.872
4	0.911 1	2.426	0.376

现采用传统的等效电路参数辨识方法对变压器 T1 进行参数辨识,分别假定其含有 5,6 条极化支路数,然后应用粒子群智能算法辨识等效电路参数^[14],再利用各自的参数值,画出对应去极化电流曲线,并与文中求解和原去极化电流曲线进行比较,比较结果如图 5 所示。通过计算含有 5 条和 6 条极化支路数的去极化电流拟合优度分别为 0.794 0,0.881 6。

现对另一台运行 6 年轻微老化的变压器 T2(型号为 SZg-31500/110)在充电时间为 1 000 s 时的去极化电流曲线进行分析,应用文中提出的时域微分解谱法求得的子谱线参数如表 3 所示,其不同极化支路数的去极化电流曲线比较结果如图 6 所示。通过计算含有 4,5 和 6 条极化支路数的去极化电流拟合优度分别为 0.769 6,0.906 9 和 0.946 9。

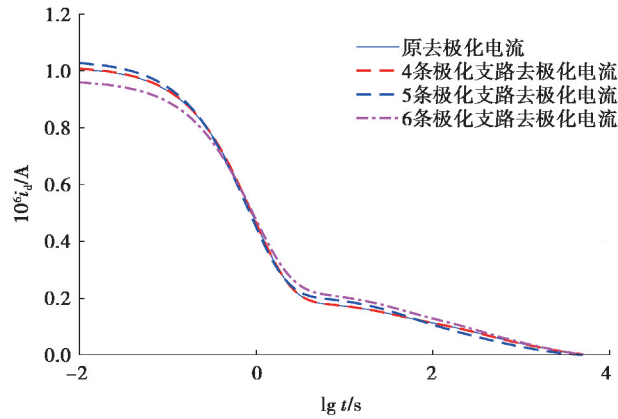


图 5 T1 不同极化支路数的去极化电流比较图

Fig. 5 Comparative diagram of depolarization current curves with different numbers of polarimetric branches of T1

表 3 变压器 T2 各条子谱线参数

Table 3 The subspectrum's parameters of T2

时域微分子谱线	τ_i/s	$B_i/1 \times 10^{-7} A$
1	635.680 0	2.43
2	12.630 0	8.86
3	1.590 0	19.26
4	0.264 1	29.72
5	0.061 3	62.51
6	0.017 3	91.73

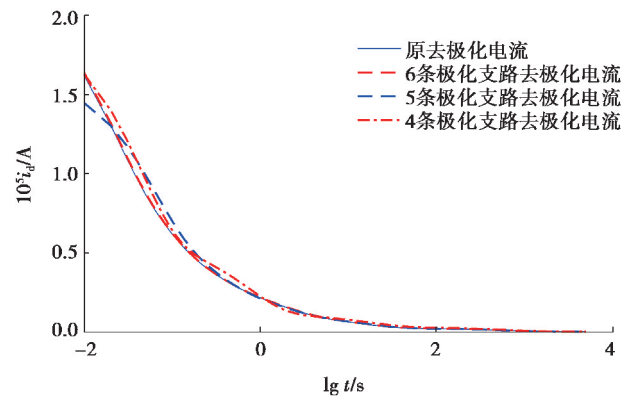


图 6 T2 不同极化支路数的去极化电流比较图

Fig. 6 Comparative diagram of depolarization current curves with different numbers of polarimetric branches of T2

综上所述,含有 4 条极化支路的变压器 T1 去极化电流曲线与原去极化电流曲线吻合度最佳,含有 6 条极化支路的变压器 T2 去极化电流曲线与原去极化电流曲线吻合度最佳,进一步验证文中所提方法的可靠性。通过对多台不同老化状态变压器的分析,均能验证文中提出的等效电路参数辨识方法的可靠性。

4 结束语

针对目前关于变压器油纸绝缘系统等效电路极化支路数判定及其参数辨识的局限性,文中采用去极化电流微分解谱方法,结合去极化电流的时域微分子函数谱线特性,分解隐藏在去极化电流曲线中各极化支路参数,达到直接判定极化支路数和参数辨识的目的,并通过子谱线参数直接辨识等效电路参数,避免了其他优化算法的局部最优问题,提高变压器等效电路参数辨识的准确性,为后续变压器绝缘状态评估提供重要依据,同时为准确辨识变压器等效电路参数提供新方法。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Samarasinghe W M S C, Kumara J R S S, Fernando M A R M, et al. Aging assesment of transformer pressboard insulation by micro-strip ring resonator at GHz frequencies[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1923-1930.
- [3] Garcia B, Garcia T, Primo V, et al. Studying the loss of life of natural-ester-filled transformer insulation: impact of moisture on the aging rate of paper[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2017, 33(1): 15-23.
- [4] 贺德华, 蔡金锭, 蔡嘉. 油纸绝缘等效电路参数辨识及老化状态评估[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 1988-1994.
He D H, Cai J D, Cai J. Method for parameter identification of equivalent circuit of oil-paper insulation and its research[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 1988-1994.(in Chinese)
- [5] 贺德华, 蔡金锭, 黄云程. 基于等效电路参数特征量的油纸绝缘老化状态评估[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(6): 44-49.
He D H, Cai J D, Huang Y C. Study on insulation condition of power transformer based on the equivalent circuit characteristic parameters[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(6): 44-49.(in Chinese)
- [6] 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, 46(6): 90-93.
Zhang J Q, Zhao T, Liu Y P. Equivalent circuit simulation analysis of dielectric response of transformer oil-paper insulation[J]. Insulating Materials, 2013, 46(6): 90-93.(in Chinese)
- [7] 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 X B, Huang Y J, Lai X S. 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.(in Chinese)
- [8] 邹阳, 蔡金锭. 变压器极化谱特征量与绝缘状态关系研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 608-614.
Zou Y, Cai J D. Study on the relationship between polarization spectrum characteristic quantity and insulation condition of oil-paper transformer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 608-614.
- [9] Ammouri A, Salah T B, Kourda F. PCB-planar transformers equivalent circuit model identification using genetic algorithm[J]. International Journal of Modelling, Identification and Control, 2018, 29(4): 295-303.
- [10] Liu Y Q, Cai J D, Guo Y X. Research on the equivalent circuit modeling of oil-paper insulation of transformer by analyzing the dielectric spectra[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 260/261: 408-413.
- [11] 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)
- [12] 王骞, 臧春艳, 张明丽. 油纸绝缘结构介质响应电路模型的参数辨识方法研究[J]. 高压电器, 2012, 48(6): 7-11, 17.

- Wang Q, Zang C Y, Zhang M L. Research on the method of parameter identification for dielectric response equivalent circuit of oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6): 7-11, 17.(in Chinese)
- [13] 廖瑞金, 刘骁, 刘捷丰, 等. 现场变压器油纸绝缘时频域介电特征量提取及状态评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 94-100.
- Liao R J, Liu X, Liu J F, et al. Extraction of time and frequency domain dielectric characteristics and condition assessment for field transformer oil-paper insulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 94-100.(in Chinese)
- [14] 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.(in Chinese)
- [15] 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 L, Zhou L J, Li X L, 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. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)