

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180988

采用回复电压曲线分解法的变压器等效电路研究

林智勇¹, 张达敏¹, 黄国泰², 曾建斌¹, 康少波¹

(1. 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024; 2. 福建省电力物资有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 针对基于回复电压法的等效电路支路数难以判定的问题, 利用回复电压数学模型, 分析了回复电压数学表达式与支路参数的关系, 提出了回复电压分解法。分离出各极化支路所代表的回复电压子曲线, 从而判定等效电路的支路数。通过实例验证表明, 利用回复电压分解法能够准确判定等效电路的极化支路数, 能更准确地反映变压器绝缘老化状况, 且变压器绝缘老化越严重, 其回复电压子曲线个数和等效电路的极化支路数越多。

关键词: 回复电压; 变压器; 等效电路; 德拜模型

Research on equivalent circuit of transformer by decomposing return voltage curve

LIN Zhiyong¹, ZHANG Damin¹, HUANG Guotai², ZENG Jianbin¹, KANG Shaobo¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Fujian Electric Power Supplies Limited, Fuzhou 350003, China)

Abstract: According to the branch number of the equivalent circuit difficult to be determined, this paper uses the mathematical model of return voltage, and analyses the relationship of the recovery voltage's mathematical expressions between branch's parameters. Then it presents decomposition method of the return voltage for separating each sub curve of return voltage which polarization branch represented, thus determines the number of the equivalent circuit's branches. It shows that the number of polarization branches of the equivalent circuit can be determined accurately and the aging condition of the transformer insulation is reflected more accurately by decomposing return voltage curve. Moreover, the more serious of the transformer insulation is, the more numbers of return voltage subcurve and polarization branches of the equivalent circuit are.

This work is supported by Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51407151) and Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2016J01747).

Key words: return voltage; transformer; equivalent circuit; Debye model

0 引言

电力变压器的绝缘状态的好坏直接影响其能否安全可靠运行, 因此准确诊断出变压器绝缘状态, 对于避免绝缘故障引起停电等重大事故具有重要意义^[1-3]。20世纪90年代兴起的回复电压法(Return Voltage Measurement, RVM)具有灵敏度高、抗干扰能力强、提供的状态信息比较全面、能充分反映变压器的油纸绝缘状态等诸多优点, 并且它是一种非破坏性检测手段^[4-7]。

目前, 国内外学者对回复电压方法进行了大量

的研究, 主要集中于利用扩展德拜模型等效电路来研究回复电压的特性^[8-10]。文献[11]利用扩展德拜模型来分析变压器油纸绝缘系统, 利用8个松弛时间常数的并联支路等效变压器绝缘系统, 通过并联支路的参数研究, 分析变压器油纸老化情况。文献[12]研究了基于扩展德拜模型的介质响应等效电路参数辨识。文章根据现场测量获得的回复电压极化谱数据, 结合非线性最小二乘法来求解该模型参数。文献[13]利用去极化电流现场测试数据求解扩展德拜等效电路参数, 并通过模型仿真分析等效电路中的支路参数变化对去极化电流曲线测量结果的影响。

但这些研究成果对于等效电路模型的支路数研究甚少, 都是根据经验假定等效电路条数来研究等

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(51407151); 福建省自然科学基金项目资助(2016J01747)

效电路模型^[14-17], 而等效电路模型的支路数与变压器绝缘老化状态有关。因此, 本文运用回复电压曲线分解法, 结合回复电压曲线数学表达式, 提出等效电路支路数的判定方法, 为构建准确反映变压器油纸绝缘老化状态的等效电路奠定重要基础。

1 回复电压函数分析

本文通过扩展德拜模型来研究变压器油纸绝缘设备的回复电压曲线。扩展德拜模型电路图如图 1 所示。

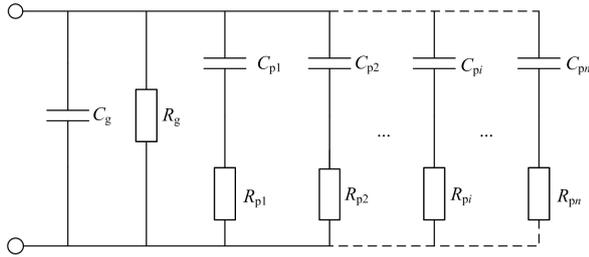


图 1 扩展德拜模型电路图

Fig. 1 Extended Debye model circuit diagram

图中: C_g 、 R_g 分别表示油纸绝缘设备的几何电容和绝缘电阻; C_{pi} 、 R_{pi} 分别表示扩展德拜模型极化支路的极化电容和极化电阻, 表征不同弛豫时间的弛豫过程^[18-20]。

根据叠加定理可知, 等效电路的回复电压值可以等效为各个极化电容电压单独作用所产生的回复电压响应之和。当极化电容 C_{p1} 单独作用时, 将图 1 对应的运算电路中其他极化支路上的电压源处用短路代替, 得到图 2。

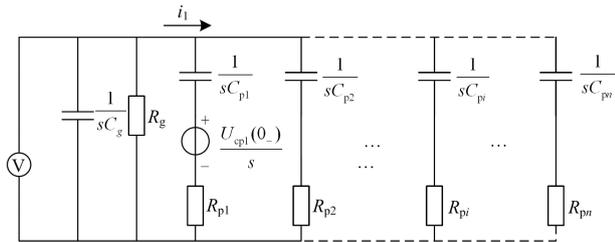


图 2 极化支路 1 单独作用下的运算电路

Fig. 2 Arithmetic circuit under polarization branch 1

对于图 2 所示电路, 根据基尔霍夫定律可建立式(1)和式(2)。

$$U_{r1}(s) = \frac{U_{cp1}(0_-)}{s} + R_{p1}I_1(s) + \frac{1}{sC_{p1}}I_1(s) \quad (1)$$

$$\frac{U_{r1}(s)}{R_g} + sC_g U_{r1}(s) + \sum_{i=2}^n \frac{U_{r1}(s)}{R_{pi} + \frac{1}{sC_{pi}}} + I_1(s) = 0 \quad (2)$$

联立式(1)和式(2), 消去 $I_1(s)$, 并整理可得式(3)。

$$U_{r1}(s) = \frac{R_g C_{p1}}{(sR_{p1}C_{p1} + 1)(sR_g C_g + 1 + \sum_{i=1}^n \frac{sR_g C_{pi}}{sR_{pi}C_{pi} + 1})} U_{cp1}(0_-) \quad (3)$$

将式(3)转化为两个实系数的 s 的多项式的比值, 如式(4)所示。

$$U_{r1}(s) = \frac{N_1(s)}{D(s)} U_{cp1}(0_-) = \frac{a_0 s^{n-1} + a_1 s^{n-2} + \dots + a_{n-1}}{b_0 s^{n+1} + b_1 s^n + \dots + b_{n+1}} U_{cp1}(0_-) \quad (4)$$

其中, a_k ($k=0, 1, \dots, n-1$)、 b_l ($l=0, 1, \dots, n+1$) 由等效电路参数组成。因为等效电路各个支路的时间常数均不相同, 所以 $D(s)=0$ 的根均为单根, 共有 $n+1$ 个单根。设 $n+1$ 个单根分别为 $-p_1$ 、 $-p_2$ 、 \dots 、 $-p_{n+1}$, ($p_i > 0$), 则 $U_{r1}(s)$ 可以展开为

$$U_{r1}(s) = \left(\frac{K_1}{s+p_1} + \frac{K_2}{s+p_2} + \dots + \frac{K_{n+1}}{s+p_{n+1}} \right) U_{cp1}(0_-) \quad (5)$$

对式(5)进行拉氏反变换, 得到 U_{r1} 的时域表达式为

$$U_{r1}(t) = (K_1 e^{-p_1 t} + K_2 e^{-p_2 t} + \dots + K_{n+1} e^{-p_{n+1} t}) U_{cp1}(0_-) \quad (6)$$

同理可求得 U_{r2} , U_{r3} , \dots , U_{rn} 。由式(3)分析可知, $-p_1$ 、 $-p_2$ 、 \dots 、 $-p_{n+1}$ 对于每个极化支路的回复电压都是一样, 根据叠加定理, 可得回复电压 $U_r(t)$ 的公式为

$$U_r(t) = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^n K_{ji} U_{cpj}(0_-) e^{-p_i t} = \sum_{i=1}^{n+1} A(i) e^{-p_i t} \quad (7)$$

式中, $A(i) = \sum_{j=1}^n K_{ji} U_{cpj}(0_-)$; $i=1, 2, \dots, n$, 且 $A(i)$ 为常数。从式(7)可以得知, 一个含有 n 条极化支路的等效电路, 其对应的回复电压曲线公式中含有 $n+1$ 个子曲线叠加而成。

2 回复电压曲线分解法

2.1 分解法理论基础

通过大量实践仿真可以得知, 任意两个曲线, 时间常数小的曲线对时间常数大的曲线末端的影响可以忽略不计。本文通过曲线 $f_1 = e^{-pt}$ 和 $f_2 = e^{-pt/3}$ 来模拟两个时间常数相差 3 倍的曲线, 图 3 为这两条曲线对比情况。

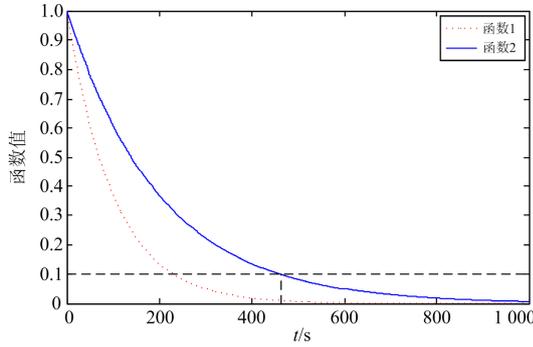


图3 曲线对比情况

Fig. 3 Comparison of spectra

函数 1 表示 $f_1 = e^{-pt}$ ，是小时间常数曲线，函数 2 表示 $f_2 = e^{-pt/3}$ ，是相对函数 1 较大的大时间常数曲线。当大时间常数曲线 $f_2 = e^{-pt/3}$ 处于 0.1 时的 $t = 464.1$ s。而此时的 t 对应的小时间常数曲线 $f_1 = e^{-pt}$ 的值 $= 0.001 = 1\% f_2$ 。由此可见，当 x 到达一定范围后，小时间常数曲线对大时间常数曲线末端的影响可忽略不计。因此，小时间常数曲线对两曲线叠加后的混合曲线末端没有影响。这正是本文采用回复电压分解法分析等效电路支路数的理论依据。

2.2 分解步骤

根据以上分析，可以得出应用回复电压曲线分解法判定介质响应等效电路支路数的过程如下。

(1) 从测试获取的回复电压曲线 U_r 最末端开始，任意取两个点 $(t_1, U_r(t_1))$ 、 $(t_2, U_r(t_2))$ ，它们满足：

$$\begin{cases} U_r(t_1) - A(1)\exp(-p_1 t_1) = 0 \\ U_r(t_2) - A(1)\exp(-p_1 t_2) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8)，通过数学运算即可获得第 1 条子曲线 U_{r1} 参数 $[A(1), p_1]$ 。

(2) 将当前 U_r 减去 U_{r1} 得到当前剩余谱线 U_{r10} ，剩余谱线 U_{r10} 在末端任意取两点 $(t_3, U_r(t_3))$ 、 $(t_4, U_r(t_4))$ ，它们满足：

$$\begin{cases} U_r(t_3) - A(2)\exp(-p_2 t_3) = 0 \\ U_r(t_4) - A(2)\exp(-p_2 t_4) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

根据式(9)，通过数学运算即可获得第 2 条子曲线 U_{r2} 参数 $[A(2), p_2]$ 。

(3) 重复步骤(2)对剩余回复电压曲线进行多次分解，求出对应子曲线的参数 $[A(i), p_i]$ ($i=3, 4, \dots, N$)。

(4) 当满足某次剩余曲线峰值小于预设的阈值时(一般为回复电压峰值的 5% 以下)，则终止分解。将分解出来的子曲线个数 N 减 1，就是介质响应等

效电路模型实际的极化支路数。

3 等效电路参数辨识

运用等效电路模型分析变压器绝缘系统的老化情况，最关键的问题是求解等效电路参数值^[16]。根据变压器扩展等效电路模型，运用基尔霍夫定律电路理论知识，可得方程式(10)和式(11)。

$$C_g \frac{dU_r(t)}{dt} + \frac{U_r(t)}{R_g} + \sum_{i=1}^n C_{pi} \frac{dU_{cpi}(t)}{dt} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{U_r(t) - U_{cpi}(t)}{R_{pi}} = C_{pi} \frac{dU_{cpi}(t)}{dt} \quad (11)$$

式中： $U_r(t)$ 为 t 时刻的回复电压值； $U_{cpi}(t)$ 为支路 i 极化电容在 t 时刻的电压； n 为极化支路数。联立式(10)、式(11)可得

$$C_g \frac{dU_r(t)}{dt} + \frac{U_r(t)}{R_g} + \sum_{i=1}^n \frac{U_r(t)}{R_{pi}} - \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} (e^{-\frac{t+t_d}{\tau_i}} + e^{-\frac{t+t_d+t_c}{\tau_i}}) = 0 \quad (12)$$

根据回复电压测量法，可以获得三个回复电压特征量，即回复电压初始斜率、回复电压最大值 U_{rmax} 和回复电压峰值时间 T_p 。通过对油纸绝缘变压器 $2n+1$ 次回复电压测量，获得对应的回复电压特征量数据组，代入式(12)，并结合粒子群智能优化算法，对等效电路参数进行辨识。由于篇幅限制，等效电路参数详细辨识过程可参考笔者已发表的文章^[14]。

4 实例验证分析

根据上述方法，对一台绝缘老化较严重的变压器 T_1 (型号为 SFL-50000/110，运行 10 年) 在测试充电时间为 100 s 时刻的回复电压曲线进行解谱分析，得到的子曲线参数如表 1 所示，分解过程如图 4 所示。

回复电压曲线分解后的剩余曲线如图 5 所示。从图 5 可知，剩余曲线的峰值与原回复电压曲线峰值相比，可以忽略不计，达到了终止分解的要求。

表 1 回复电压子曲线

Table 1 Sub curve of return voltage

曲线	$A(i)$	p_i
1	392.6	2.48e-4
2	-244.6	2.2e-3
3	28.3	5.6e-3
4	-102.1	1.61e-2
5	-112.3	4.95e-2
6	39.2	7.1e-2

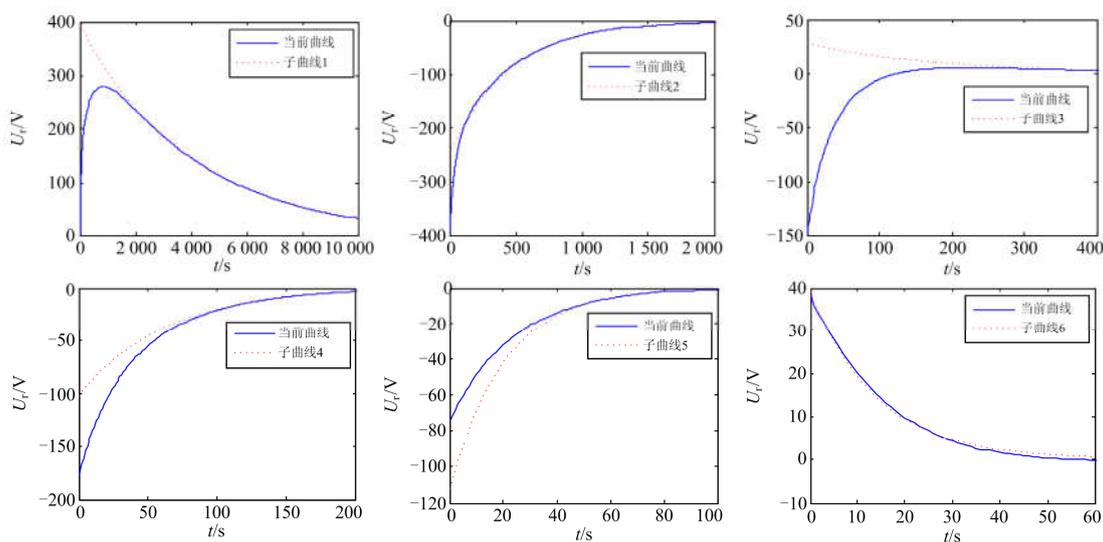


图 4 回复电压曲线分解情况

Fig. 4 Decomposition of return voltage curve

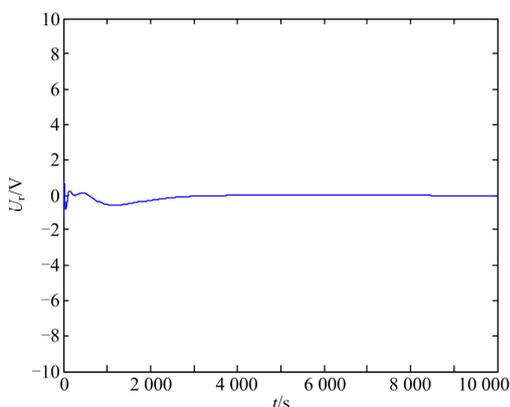


图 5 剩余回复电压曲线

Fig. 5 Remaining return voltage curve

为验证各子曲线的可靠性, 将分解得到的各子曲线叠加后的回复电压曲线与原回复电压曲线进行对比, 对比结果如图 6 所示, 其中曲线 1 为原回复电压曲线, 曲线 2 为各子曲线叠加后回复电压曲线。由图 6 可知, 两条曲线相当吻合。

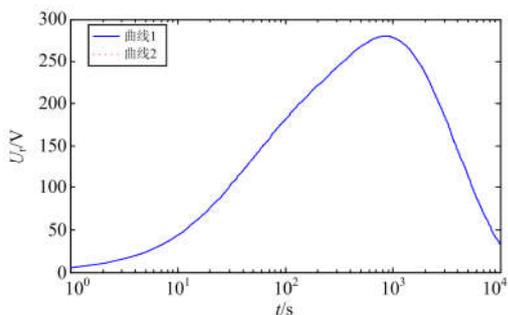


图 6 两种回复电压曲线比较图

Fig. 6 Two kinds of return voltage curve comparison chart

由图 4 可知, 本模型的回复电压曲线最终分解出 6 条子曲线, 则可推算出本模型应该含有 5 条极化支路。

为进一步验证本方法的可靠性, 笔者对变压器 T_1 分别采用 5、6、7 条极化支路数进行等效电路分析, 并利用如式(13)所示的吻合度函数来直观地比较各个等效电路求解获得的回复电压曲线与测量获得的回复电压曲线之间的吻合程度, 求解结果如表 2 所示。

$$P(X) = \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|U_r(i) - V_r(i)|}{U_r(i)} \right) \times 100\% \quad (13)$$

式中: V_r 为回复电压的计算值; U_r 为回复电压的测量值。

表 2 变压器 T_1 不同支路数的吻合度Table 2 Anastomosis degree of different branch number of T_1

支路数	吻合度/%
5	96.54
6	80.72
7	65.76

由表 2 可知, 变压器 T_1 采用 5 条极化支路数的等效电路对应的回复电压曲线吻合度最高, 即运用回复电压曲线分解法获得的等效电路能够更加准确地反映变压器绝缘老化状态。

为进一步研究变压器绝缘老化状态与等效电路支路数的内在关系, 现运用本文提出的等效电路构建方法, 对一系列不同绝缘状态的变压器分析其等效电路的模型情况。研究结果如表 3 所示。

表 3 各变压器等效电路的支路数情况

Table 3 Number of branches of transformers' equivalent circuit

变压器	型号	老化状态	支路数
T ₂	SFZ7-31500/110	严重	7
T ₃	SFL-50000/110	严重	6
T ₄	SFSE9-240000/220	较严重	5
⋮	⋮	⋮	⋮
T ₁₄	SZG-31500/110	良好	4
T ₁₅	SFP9-240000/220	良好	4

从表 3 可知, 变压器等效电路的支路数与其内部绝缘老化情况有关系, 且随着变压器绝缘老化程度的加剧, 其对应的等效电路支路数也随之增加。这是由于变压器绝缘老化加剧, 其内部绝缘老化产物增多, 导致绝缘介质的极化特性更加复杂, 从而导致反映其极化特性的极化支路增多。

5 结论

研究回复电压曲线是目前常用的变压器油纸绝缘系统绝缘状况诊断方法, 而扩展德拜等效电路模型又是研究回复电压曲线特性的关键。通过本文的研究, 可以得到以下几点重要结论:

(1) 利用变压器绝缘介质的介电响应理论, 解析回复电压函数公式, 从中探究回复电压曲线与绝缘介质极化过程的内在联系;

(2) 提出的回复电压曲线分解法能够依据变压器绝缘老化情况, 准确判定变压器等效电路的极化支路数, 为后续准确诊断变压器绝缘状况奠定重要基础;

(3) 变压器绝缘介质主要有绝缘油和绝缘纸, 下一步应重点研究回复电压子曲线与绝缘油、绝缘纸老化的内在联系, 为后续绝缘油、绝缘纸的老化诊断提供依据。

参考文献

[1] 甘锡淞, 李云, 傅成华, 等. 基于信息融合和 CS-SVM 的变压器绕组变形故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 156-161.
GAN Xisong, LI Yun, FU Chenghua, et al. Information fusion and CS-SVM based research on diagnosis method for transformer winding deformation fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 156-161.

[2] 金贵阳, 杨克己, 戴永军, 等. 智能配电变压器的串变调压和基于漏磁的绝缘故障检测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 103-108.
JIN Guiyang, YANG Keji, DAI Yongjun, et al. Voltage regulation and insulation fault detection technology of

intelligent distribution transformer[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 103-108.

[3] 张琳, 马宏忠, 姜宁, 等. 基于奇异谱熵和支持向量机的变压器绕组松动识别及定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 69-75.
ZHANG Lin, MA Hongzhong, JIANG Ning, et al. Recognition and location of transformer winding looseness based on singular value spectrum entropy and SVM[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 69-75.

[4] 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. Influence of temperature on polarization and depolarization current of oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 290-297.

[5] SAMARASINGHE W, KUMARA J, FERNANDO M, et al. Aging assessment 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.

[6] SAHA T K, PURKAIT P, MTILLER F. Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 149-157.

[7] 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.

[8] XU S Z, MIDDLETON R, FETHERTON 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, IEEE, June 1-5, 2003, Nagoya, Japan: 351-355.

[9] 许渊, 刘有为, 王文焕, 等. 大型电力变压器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.

- [10] 祝顺才, 蔡金锭. 基于模糊-灰色聚类的油纸绝缘状态综合诊断[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 718-725.
ZHU Shuncai, CAI Jinding. Comprehensive diagnosis of oil-paper insulation status based on fuzzy gray clustering[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 718-725.
- [11] YU X Z, BIRLASEKARAN S. Study of recovery voltage mechanism[C] // Proceedings of 6th International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, June 21-26, 2000, Xi'an, China: 935-938.
- [12] XU S Z, MIDDLETON R, FETHERTON 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, June 1-5, 2003, Nagoya, Japan: 351-355.
- [13] 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.
- [14] 林智勇, 蔡金锭. 基于回复电压特征量的油纸绝缘老化诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(11): 1669-1676.
LIN Zhiyong, CAI Jinding. Aging diagnosis of oil-paper insulation based on the return voltage characteristics[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(11): 1669-1676.
- [15] 谢松, 邹阳, 蔡金锭. 基于模糊粗糙集的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 190-197.
XIE Song, ZOU Yang, CAI Jinding. Assessment of transformer oil-paper insulation status with fuzzy rough set[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 190-197.
- [16] 甘德刚, 青晨唯, 刘凡, 等. 基于最小二乘法的变压器油中微水含量在线监测方法[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 48-52, 57.
GAN Degang, QING Chenwei, LIU Fan, et al. Study on the on-line monitoring of moisture content in power transformer oil using least square method[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 48-52, 57.
- [17] 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.
- [18] 郭洪英. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 170-175.
GUO Hongying. Diagnostic method of transformer insulation aging based on the recovery voltage polarization spectrum' wavelet packet transform[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 170-175.
- [19] 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.
- [20] 贺德华, 蔡金锭, 蔡嘉. 基于弛豫电量的变压器油纸绝缘老化评估[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1079-1085.
HE Dehua, CAI Jinding, CAI Jia. Aging evaluation of transformer oil-paper insulation based on quantity of relaxation charge[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1079-1085.

收稿日期: 2018-08-04; 修回日期: 2018-12-27

作者简介:

林智勇(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电气设备绝缘监测与故障诊断; E-mail: 625720199@qq.com

张达敏(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;

黄国泰(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力设备质量及可靠性分析。

(编辑 魏小丽)