

油纸绝缘系统回复电压函数建模及拓扑结构辨识

黄云程,蔡金铨

(福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350108)

摘要: 基于扩展德拜等效电路模型与时域介电响应原理,提出一种能够真实反映绝缘介质响应过程的回复电压函数模型,并利用该函数模型辨识油纸绝缘系统拓扑结构。实验结果验证了所提回复电压函数模型以及油纸绝缘系统拓扑结构辨识方法的可行性与准确性,并且通过等效电路的极化支路条数可初步诊断变压器油纸绝缘老化状态。

关键词: 油纸绝缘; 变压器; 回复电压函数; 拓扑结构; 等效电路; 模型

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.03.023

0 引言

目前,介质响应测量技术作为一种简便、有效、无损的绝缘检测方法,被广泛应用于电力变压器油纸绝缘老化状态评估^[1]。回复电压法(RVM)是其中一种重要的介质响应测量法,能准确地反映绝缘材料缓慢弛豫过程,可以有效地诊断绝缘的老化和受潮状态^[2]。目前,国内外一些学者深入研究油纸绝缘系统的拓扑结构,并建立基于扩展德拜模型的油纸绝缘介质响应等效电路模型,但没有提出具体确定等效极化支路数的方法,且所建立的模型复杂,无法直观反映绝缘老化弛豫过程与回复电压的关系^[3-4]。正是由于支路数的不确定,导致无法深入研究绝缘系统真实老化过程。

鉴于上述不足,建立能够直观真实反映油纸绝缘弛豫响应特性的回复电压函数模型显得极其重要。本文基于扩展德拜等效电路模型与时域介电响应原理,提出一种能够真实反映绝缘介质响应过程的回复电压函数模型,并利用该函数模型提出辨识油纸绝缘系统拓扑结构的方法。该方法结合回复电压函数模型为后续研究油纸绝缘介质响应特性提供一种可靠而有力的分析手段,为准确评估变压器绝缘状态奠定了基础。

1 回复电压函数建模

1.1 回复电压测试法

回复电压测试法能揭示绝缘介质材料内部缓慢极化作用的过程,是一种不需要吊芯、无损的绝缘检测方法^[5]。该测试方法的原理如下:绝缘介质两端施加直流高压时,会呈现极化现象,表面出现束缚电荷,内部偶极子定向排列;撤去外施电压并短接两极

后,表面电荷立即释放,同时介质内部会发生缓慢去极化过程;去掉两极间的短接线后,去极化过程仍在继续,自由电荷会在电极之间呈现一个电势差,称为回复电压^[6],测量电路如图1所示。本文采用RVM5461自动回复电压测试仪进行现场测试。根据图1,闭合开关 S_1 ,在绝缘介质两端施加一直流高压 U_0 ;充电 t_c 时间后打开 S_1 ,闭合开关 S_2 ,即去除外施电压并短接介质; t_d 时间后,停止短接,即打开 S_1 ,闭合 S_3 ,若去极化过程还在继续,剩余的自由电荷将在两极形成回复电压,得到回复电压曲线^[7],如图2所示。

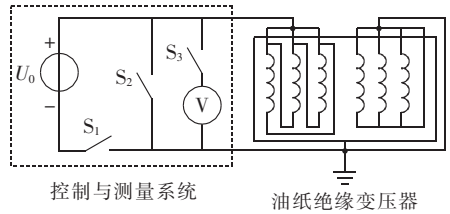


图1 回复电压测量电路图

Fig.1 Circuit of return voltage measuring

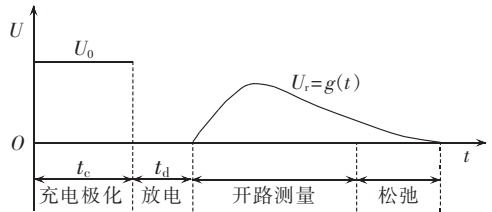


图2 回复电压曲线

Fig.2 Return voltage curve

1.2 油纸绝缘系统介质响应等效电路

油纸绝缘作为一种复合介质,不仅有绝缘油、绝缘纸的弛豫过程,而且还包含绝缘系统老化有关的各种产物,如微水、醛、醇、酸和酮等的弛豫响应过程^[8]。因此,油纸绝缘复合介质的弛豫过程可采用扩展德拜等效电路模型来表征^[9]。该等效电路包括几何等效电路和极化等效电路,如图3所示。几何等效电路中 R_g 和 C_g 分别为油纸绝缘系统的绝缘电阻和几何电容,主要与变压器的结构有关;极化等效电路中,采

收稿日期:2015-01-08;修回日期:2015-11-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174117)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61174117)

用 N 条极化电阻 R_p 和极化电容 C_p 串联支路并联来模拟油纸绝缘系统内部不同弛豫时间 $t_i=R_{pi}C_{pi}$ 下的介质极化现象,并随绝缘状态不同而变化^[10-12]。

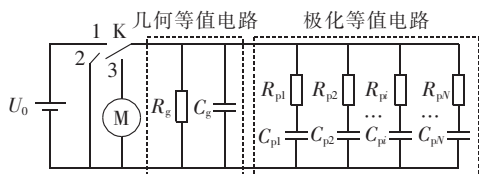


图 3 基于扩展德拜模型的介质响应等效电路

Fig.3 Equivalent dielectric response circuit based on extended Debye model

1.3 回复电压函数模型

单一介质的回复电压测试原理与图 3 相同,充电时间 $0 \sim t_c$ 内,单一介质可以用图 4 极化等效电路中的 1 条极化支路表示^[13],此时电容存储的电量为:

$$Q_{ci}(t) = C_i U_0 (1 - e^{-t/t_i}) \quad 0 \leq t \leq t_c \quad (1)$$

其中, C_i 为单一介质的等效电容; t_i 为单一介质的弛豫时间常数^[14]。 $t = t_d$ 短接放电结束后,单一介质剩余电量为:

$$Q_{ci}(t_c + t_d) = C_i U_0 (1 - e^{-t_c/t_i}) e^{-t_d/t_i} \quad (2)$$

当 $t > t_d$ 时,引入虚拟电阻 r_i ,其由测试电压表内阻、绝缘漏电阻、其他极化支路对该条极化支路影响的等效电阻以及外界因素的等效电阻共同组成。则可用剩余电量通过虚拟电阻 r_i 放电,采用回路电流 dQ_{ci}/dt 在虚拟电阻 r_i 上产生的电压降来模拟单一介质去极化过程的回复电压曲线,如图 4 所示。因此,单一介质上的回复电压为:

$$U_{ri}(t) = -r_i i = r_i \frac{dQ_{ci}}{dt} = \frac{r_i}{\tau_i} Q_{ci}(t_c + t_d) e^{-t/\tau_i} = \frac{r_i}{\tau_i} C_i U_0 (1 - e^{-t_c/t_i}) e^{-t_d/t_i} e^{-t/\tau_i} \quad (3)$$

其中, $\tau_i = (R_i + r_i)C_i$ 表示测试回复电压时的弛豫时间常数^[15]。

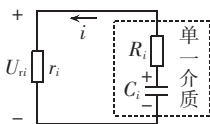


图 4 单一介质的回复电压

Fig.4 Return voltage of unitary dielectric

油纸绝缘系统的回复电压由 N 条极化支路利用叠加定理得到,每条极化支路可等效为单一介质,因此可建立新型的回复电压函数模型:

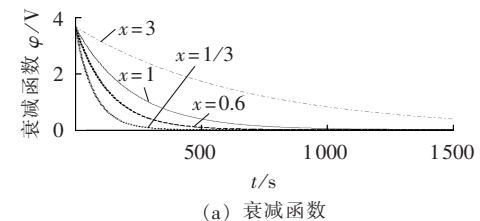
$$U_r(t) = \sum_{i=1}^N U_{ri}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{r_i}{\tau_i} C_i U_0 (1 - e^{-t_c/t_i}) e^{-t_d/t_i} e^{-t/\tau_i} = \sum_{i=1}^N A_i e^{-t/\tau_i} \quad (4)$$

2 回复电压函数模型特性分析

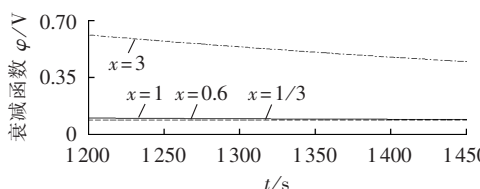
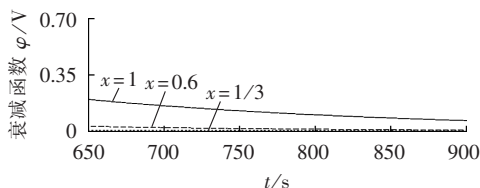
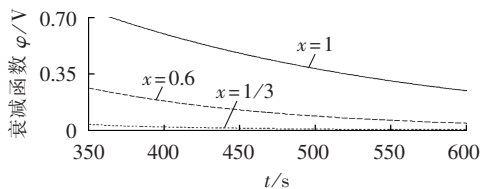
特性 1:由式(4)可以直观看出 N 条极化支路对应的回复电压函数表达式含有 N 个指数型衰减项,且对应含有 N 个弛豫时间常数。

特性 2:变压器在正常运行时,随着运行年限的增加,绝缘开始老化,绝缘内部结构特性发生变化,介质响应过程也将不同,使得等效的极化支路数、极化电阻值以及极化电容值发生改变。回复电压函数表达式能随着绝缘状态变化相应地体现在衰减项个数 N 和弛豫时间常数 τ_i 上的变化。

特性 3:回复电压函数表达式由不同弛豫时间常数的指数型衰减函数 $\varphi(A_i, t/\tau_i)$ 组成,且衰减函数末端 τ_i (大)可以忽略前一项 τ_{i-1} (小)的影响。 $\varphi(A_i, t/\tau_i)$ 中 A_i 变化引起 $\varphi(A_i, t/\tau_i)$ 幅值的比例扩大或减小; τ_i 变化时, $\varphi(A_i, t/\tau_i)$ 的位置将出现平移。因此,可通过 $\varphi(A_i, t/\tau_i \cdot x)$ 来仿真同一比例系数 A_i 且不同弛豫时间常数下衰减函数的对比情况。选取 4 个不同的 x 值,得到的对比关系如图 5 所示。



(a) 衰减函数



(b) 局部放大图

图 5 同一 A_i 不同 τ_i 下的 $\varphi(A_i, t/\tau_i)$

Fig.5 Curve of $\varphi(A_i, t/\tau_i)$ for different values of τ_i

由图 5 可得,弛豫时间常数越大衰减越慢;3 个细节放大图表明,相邻的 2 个不同弛豫时间下的衰减函数在末端处影响极其小,基本可以忽略不计;当 τ_i 差别越大时,这一特性更加明显。

3 油纸绝缘系统拓扑结构辨识

根据回复电压函数模型特性,回复电压函数所含衰减项个数等于极化支路数,且衰减函数末端可忽略前一项 τ_{i-1} (小)对后一项 τ_i 的影响。因此,不同弛豫时间常数的指数型衰减函数可以分离出来,根据分离出的衰减函数个数即可判定出绝缘的拓扑结构。分离的具体步骤如下。

a. 利用回复电压测试仪实测变压器回复电压数据。

b. 根据特性 3,回复电压函数表达式的组成部分——指数型衰减函数末端可忽略前一项 τ_{i-1} (小)对后一项 τ_i 的影响。因此在回复电压曲线最末端任意取出 2 点,可求出当前曲线最大弛豫时间下的衰减函数,即得到方程组:

$$\begin{cases} U_{ri}(t_1)=A_ie^{-t_1/\tau_i} \\ U_{ri}(t_2)=A_ie^{-t_2/\tau_i} \end{cases} \quad (5)$$

其中, A_i 、 τ_i 为待求未知数。对方程两边取对数:

$$\begin{cases} \ln(U_{ri}(t_1))=\ln A_i-t_1/\tau_i \\ \ln(U_{ri}(t_2))=\ln A_i-t_2/\tau_i \end{cases} \quad (6)$$

通过式(6)即可求解出 A_i 、 τ_i 的精确解,从而得到 1 个子函数即指数型的衰减函数 $\varphi(A_i,t/\tau_i)$ 。

c. 定义吻合度如式(7)所示。

$$Q_i=\left[1-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\left(\frac{U_{ri}-U'_{ri}}{U_{ri}}\right)^2\right]\times 100\% \quad (7)$$

其中, n 表示 n 组测量值和拟合值; U_{ri} 为第 i 个回复电压测量值; U'_{ri} 为第 i 个回复电压拟合值。将当前回复电压函数与当前所有子函数之和作比较并按式(7)求取吻合度。

d. 设定吻合度阈值 Q ,当吻合度大于阈值时,将当前回复电压函数减去当前所有子函数之和,得到剩余函数作为新的回复电压函数,并返回步骤 b 执行,即可求解出第 2、3、 $\cdots$ 、 N 个子函数,直到吻合度小于阈值,转至步骤 e。

e. 将 N 个子函数求和,即可得到回复电压函数的拟合曲线,其中 N 即为介质响应等效电路的极化支路数,从而确定等效电路的拓扑结构。

油纸绝缘系统拓扑结构辨识的流程图见图 6。

4 实验结果与分析

对 3 台不同老化状态的变压器进行 RVM 现场测试,变压器的基本信息见表 1。

根据上述的辨识方法,利用本文提出的新型回复电压函数模型分别对表 1 中的 3 台变压器 T_1 、 T_2 和 T_3 的回复电压曲线进行拓扑结构辨识, T_1 、 T_2 和 T_3 的求解过程图分别如图 7—9 所示,计算得到:变压器 T_1 子函数个数为 5,其吻合度为 99.998 9%;变压器 T_2 子函数个数为 6,其吻合度为 99.908 9%;变压器

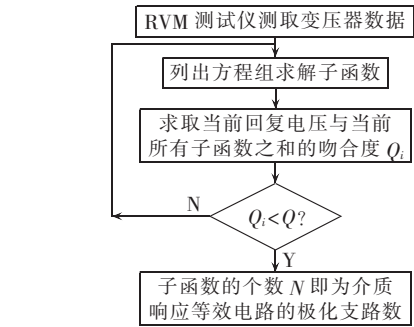


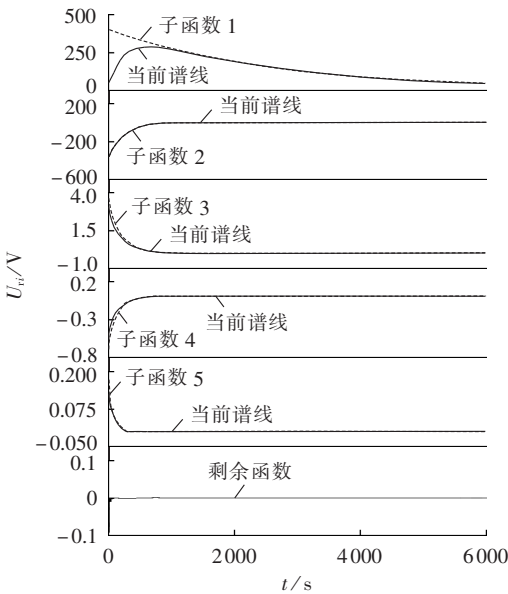
图 6 油纸绝缘系统拓扑结构辨识流程图

Fig.6 Flowchart of topology identification for oil-paper insulation system

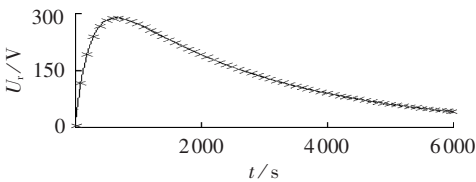
表 1 3 台变压器的老化情况

Table 1 Aging condition of three transformers

变压器	型号	糠醛含量/(mg·L ⁻¹)	老化情况
T ₁	SFSE9-240000/220	0.15	绝缘良好
T ₂	SSZ10-31500/110	3.87	老化较严重
T ₃	cub-MRM	31.60	老化严重



(a) 子函数和剩余函数



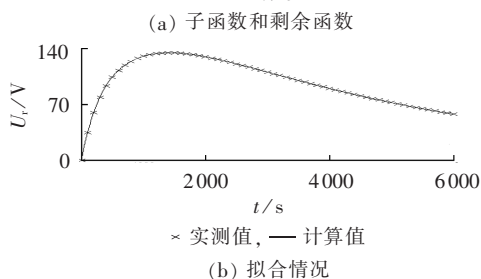
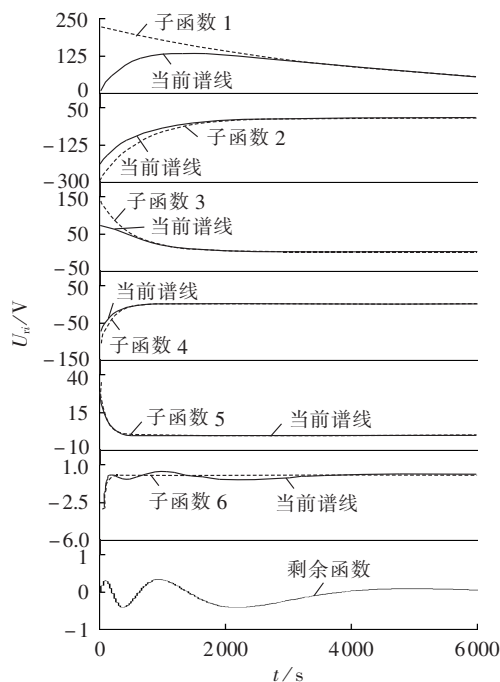
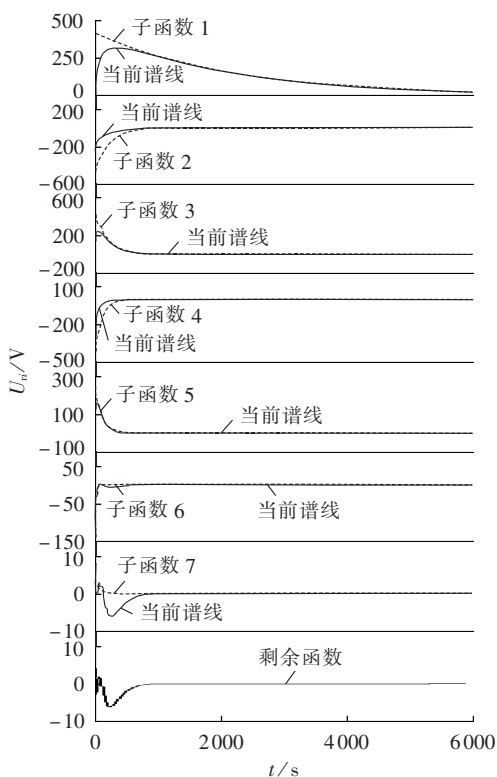
(b) 拟合情况

图 7 变压器 T₁ 的回复电压衰减函数及拟合情况

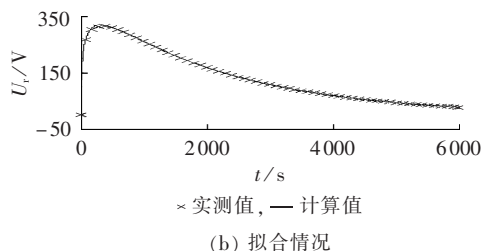
Fig.7 Return voltage attenuation functions and fitting curve of Transformer T₁

T_3 子函数个数为 7,其吻合度为 99.5202%。

由图 7—9 和吻合度知,不同老化状态的变压器均可利用本文提出的回复电压函数模型进行分解重构,且吻合度接近 100%,精度较高。此外,绝缘良好的变压器 T_1 含有 5 个指数型衰减函数,绝缘老化较

图 8 变压器 T_2 的回复电压衰减函数及拟合情况Fig.8 Return voltage attenuation functions and fitting curve of Transformer T_2 

(a) 子函数和剩余函数



(b) 拟合情况

图 9 变压器 T_3 的回复电压衰减函数及拟合情况Fig.9 Return voltage attenuation functions and fitting curve of Transformer T_3

严重的变压器 T_2 含有 6 个指数型衰减函数,绝缘老化严重的变压器 T_3 含有 7 个指数型衰减函数,经大量数据验证,皆有上述结论,故可利用油纸绝缘系统的拓扑结构定性分析变压器老化状态,即等效极化支路数越多,则变压器的绝缘老化越严重。

5 结论

回复电压法作为一种无损的变压器油纸绝缘老化状态评估技术,目前对于回复电压表达式推导和等效极化支路数辨识还不成熟。本文基于扩展德拜等效电路模型与时域介电响应原理,提出一种能够真实反映绝缘介质响应过程的新型回复电压函数模型,并利用该函数模型提出辨识油纸绝缘系统拓扑结构的方法。有如下结论。

a. 本文通过引入虚拟电阻来模拟绝缘去极化过程,并推导出回复电压函数表达式。

b. 本文分析了回复电压函数表达式的特性,并利用其特性辨识出变压器油纸绝缘的拓扑结构,从而解决了一直备受争议的油纸绝缘介质响应模型极化支路数的问题,为深入研究绝缘系统真实老化过程奠定基础。

c. 本文利用方程组解析求解子函数参数,并利用吻合度进行验证,避免了优化算法求解的随机性,证实本文提出的回复电压函数模型及辨识变压器绝缘拓扑结构方法的准确性和可行性。

d. 利用本文提出的油纸绝缘拓扑结构辨识方法对大量实测变压器数据进行辨识,初步得到变压器绝缘评估判据:绝缘状态越差则等效电路的极化支路数越多。这为评估变压器绝缘状态提供了新思路与方法。

参考文献:

- [1] 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.

- [2] 陈伟根,杜杰,凌云,等. 变压器油纸绝缘气隙放电能量-小波矩特征及放电过程划分[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):89-95.
CHEN Weigen,DU Jie,LING Yun,et al. Energy-wavelet moment characteristics of air-gap discharge in oil-paper insulation of transformer and partition of discharge process[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(6):89-95.
- [3] MITCHINSON P M,LEWIN P,CHEN G C,et al. An experiment for evaluating the scale effect of moisture on high voltage transformer insulation[C]//Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Toronto,Canada: IEEE,2006:218-221.
- [4] 杨丽君,齐超亮,郝建,等. 变压器油纸绝缘水分含量的频域介电特征参量及评估方法研究[J]. 电工技术学报,2013,28(10):59-66.
YANG Lijun,QI Chaoliang,HAO Jian,et al. Frequency-domain dielectric characteristic parameter and moisture content assessment methods study on frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation for transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(10):59-66.
- [5] SAHA T K,PURKAIT P,MULLER 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.
- [6] 江修波,张涛,黄彦婕. 变压器油纸绝缘极化谱的仿真研究[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):31-35.
JIANG Xiubo,ZHANG Tao,HUANG Yanjie. Simulation of transformer insulation polarization spectrum[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(2):31-35.
- [7] LELEKAKIS N,GUO Wenyu,MARTIN D,et al. A field study of aging in paper-oil insulation systems[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2012,28(1):12-19.
- [8] 杨丽君,廖瑞金,孙会刚,等. 变压器油纸绝缘热老化特性及特征量研究[J]. 电工技术学报,2009,24(8):27-33.
YANG Lijun,LIAO Ruijin,SUN Huigang,et al. Investigation on properties and characteristics of oil-paper insulation in transformer during thermal degradation process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(8):27-33.
- [9] 李景德,雷德铭. 电介质材料物理和应用[M]. 广州:中山大学出版社,1992.
- [10] GILBERT R,JALBERT J,DUCHESNE S,et al. Kinetics of the production of chain-end groups and methanol from the depolymerization of cellulose during the ageing of paper/oil systems, part 2:thermally upgraded insulating papers[J]. Cellulose,2010,17(2):253-269.
- [11] 王晓剑,吴广宁,李先浪,等. 酸值对变压器油纸绝缘系统回复电压参数影响规律研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):133-139.
WANG Xiaojian,WU Guangning,LI Xianlang,et al. Influence of acid value on recovery voltage parameters of transformer oil-paper insulation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(12):133-139.
- [12] 熊维兵,蔡金铨. 油纸绝缘系统等效电路参数的计算及应用[J]. 福州大学学报:自然科学版,2013,41(2):186-191.
XIONG Weibing,CAI Jinding. The calculation and application of oil-paper insulation system equivalent circuit parameters[J]. Journal of Fuzhou University:Natural Science Edition,2013,41(2):186-191.
- [13] 李安娜,蔡金铨. 油纸绝缘系统混联等效电路及参数辨识的研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(9):2130-2136.
LI Anna,CAI Jinding. Study on parallel-series equivalent circuit and parameters identification of oil-paper insulation system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2014,35(9):2130-2136.
- [14] 李功新,江修波,蔡金铨,等. 采用微分去极化电流法解析变压器油纸绝缘的介质响应函数[J]. 高电压技术,2012,38(8):1930-1936.
LI Gongxin,JIANG Xiubo,CAI Jinding,et al. Dielectric response function for transformer oil-paper insulation solved by the method of differential depolarization current[J]. High Voltage Engineering,2012,38(8):1930-1936.
- [15] 彭积城,蔡金铨. 油纸绝缘变压器老化特征分析[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(7):763-769.
PENG Jicheng,CAI Jinding. Analysis on aging characteristics of oil-paper insulated transformer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2014,28(7):763-769.

作者简介:



黄云程

黄云程(1990—),男,福建漳平人,硕士研究生,主要从事变压器油纸绝缘系统故障诊断的研究(E-mail:564053406@qq.com);

蔡金铨(1954—),男,福建晋江人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统故障诊断。

Return voltage function modeling and topology recognition of oil-paper insulation system

HUANG Yuncheng,CAI Jinding

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

Abstract: Based on Debye equivalent circuit model and time-domain dielectric response principle,a return voltage function model of insulation dielectric is proposed to reflect its response process,which is used to identify the topological structure of oil-paper insulation system. The feasibility and correctness of the proposed model and identification method are verified by the experimental results and the aging condition of transformer oil-paper can be preliminarily diagnosed by the number of equivalent polarization branches.

Key words: oil-paper insulation; electric transformers; return voltage function; topology; equivalent circuit; models