

变压器油纸绝缘极化谱的仿真研究

江修波¹, 张 涛², 黄彦婕¹

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350002;

2. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 回复电压测量方法能有效检测变压器固体绝缘的含水量, 然而对于含有局部峰值点的回复电压极化谱, 难以给出明确的诊断结论。在引入扩展德拜模型基础上, 建立了绝缘极化、老化过程和等值电路参数三者之间的关系, 并仿真分析了电路参数的改变引起特征量和极化谱的变化规律。仿真分析结果表明, 回复电压特征量的主时间常数能诊断不同几何电容的变压器的绝缘状态, 是一个诊断绝缘状态的有效特征量; 而且极化谱的形状也是诊断绝缘状态的有效特征量, 其终端部分的形状和回复电压值能反映固体绝缘的老化状态。试验研究结果证明仿真结论是有效的。

关键词: 回复电压; 绝缘诊断; 老化; 电力变压器; 极化谱

中图分类号: TM 855; TP 391.9

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)02-0031-05

0 引言

电力变压器固体绝缘状态的好坏直接影响其能否安全可靠运行, 因此诊断变压器固体绝缘的状态具有重要意义^[1-3]。然而, 诊断变压器固体绝缘状态的传统方法只能给出固体绝缘状态的部分信息, 如介质损耗、绝缘电阻及局部放电等现场测量方法^[1]。为了更有效地诊断出变压器固体绝缘的状态, 有必要研究一些新的现场诊断方法。基于介质响应理论的回复电压测量 RVM(Return Voltage Measurement)技术是一种无损的电气绝缘诊断方法, 它能利用绝缘介质极化特性诊断变压器固体绝缘的水分含量, 进而评估其固体绝缘的老化状态^[2]。通过改变充电时间与放电时间, 进行一系列回复电压测量, 可获得回复

电压最大值与充电时间之间的关系曲线, 即极化谱。极化谱中的回复电压最大值对应的充电时间称为主时间常数, 它能反映固体绝缘中的水分含量^[3]。然而对于极化谱中含有多个局部峰值点的曲线, 试验研究难以解释这种现象, 因此, 本文利用基于扩展德拜模型的等值电路, 仿真分析了绝缘介质电路参数与回复电压特征量之间的关系, 对松弛响应机理进行分析, 能更好地理解极化谱的变化规律; 并通过仿真结果提出了一些新的诊断固体绝缘状态的思路。

1 回复电压测量原理

1.1 回复电压测试过程与极化谱

回复电压测量技术是一种研究绝缘介质缓慢极化过程的电气方法, 该方法通过极化谱的变化分析绝缘介质的水分含量, 进而评估绝缘系统总体运行状态^[4-5]。图 1 为回复电压测试电路示意图, 其中 U

收稿日期: 2010-11-01; 修回日期: 2010-12-07

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2010J01283)

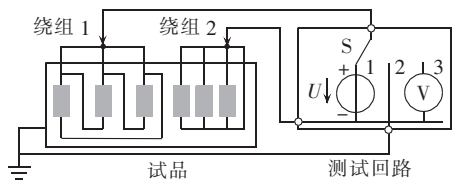


图 1 回复电压测试电路示意图

Fig.1 Test circuit of return voltage measurement

为直流电压源, S 为开关。

回复电压的测量过程如下: 首先将开关 S 闭合到位置 1, 直流电压源 U 对试品进行充电, 在充电期间, 绝缘介质将被极化, 表面出现束缚电荷, 内部偶极子按电场方向呈定向排列^[6]。充电一段时间后, 将开关 S 闭合到位置 2, 试品被短路一段时间 (一般为充电时间的一半), 绝缘介质去极化, 部分电容电荷被释放。放电结束后, 自由电荷将全部被释放, 打开开关 S, 残余极化仍然存在, 电介质去极化过程继续, 剩余极化电荷将在电极上形成一个电压响应, 被称为回复电压 U_r , 将 S 闭合到位置 3, 测试仪器 V 将记录回复电压最大值、时间常数及其初始斜率等相应特征参数^[7]。逐步改变充电时间, 进行一系列的回复电压测量, 即可获得每个循环回复电压最大值随充电时间变化的曲线, 即回复电压极化谱^[6-7]。一个典型变压器的极化谱如图 2 所示, 图中纵坐标 U_r 为回复电压值, 而横坐标 (对数坐标, 下同) τ_c 为对应的充电时间常数。

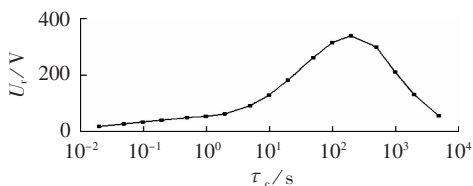


图 2 典型变压器极化谱

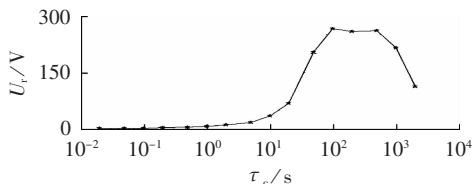
Fig.2 Polarization spectrum of typical transformer

1.2 含有局部峰值点的极化谱

虽然回复电压具有较好的抗干扰能力, 可现场诊断变压器的绝缘状态, 然而, 由于试验环境的影响, 回复电压值较低的变压器的极化谱常会受到残余电荷等因素的影响, 造成极化谱出现异常现象, 而试验研究难以有效地解释这些因素对极化谱的影响。而且, 油纸绝缘系统老化后, 电介质响应中包含很多的界面松弛以及偶极松弛极化等过程, 因此, 绝缘介质的极化过程相当复杂^[8]。

如一台三相变压器 T_1 , 其额定容量为 $120 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 在变电站运行了 20 多年, 在退出运行很长一段时间后, 使用回复电压测量方法进行了测试, 变压器测试时温度在 38°C 左右。回复电压测试获得该变压器的极化谱曲线如图 3 所示。

变压器 T_1 的极化谱中出现了 2 个峰值点, 对于具有 2 个局部峰值点的极化谱, 很难准确合理地解释这种现象, 而且难以确定准确的主时间常数。因此, 为准确诊断变压器的绝缘状态, 必须分析产生

图 3 变压器 T_1 的极化谱Fig.3 Polarization spectrum of transformer T_1

这种现象的机理, 为绝缘状态提供理论依据。为此, 下文通过建立油纸绝缘系统的等值电路模型, 来揭示造成极化谱异常的机理。

2 均一绝缘系统的建模与仿真

2.1 均一绝缘系统的建模

对于任意电介质都可以用图 4 所示的平板电容器模型来模拟其等效电气性能^[9]。

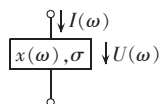


图 4 电介质平板电容模型

Fig.4 Plate dielectric capacitor model

根据线性均一介质理

论, 图 4 中的均一绝缘介质模型既可通过时域中的介质响应函数 $f(t)$ 来描述其介质响应过程, 也可通过频域中的极化特征函数 $x(\omega)$ 以及电导率 σ 来描述^[10]。因此, 简单结构的均一绝缘体可用图 5 所示的等值电路来表示。图中, C_g 为介质的几何电容; R_g 为绝缘电阻, R_p 、 C_p 为绝缘极化等值电路参数, 分别为等效极化电阻和极化电容, 其乘积为松弛时间常数, 它能有效模拟绝缘介质的松弛特性。

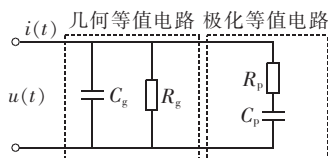


图 5 均一绝缘系统介质响应等值电路

Fig.5 Dielectric response equivalent circuit of uniform insulation system

2.2 均一绝缘介质电路几何参数的仿真

为了仿真极化过程, 利用均一绝缘系统介质响应的等值电路, 通过改变电路参数可以研究电路参数对回复电压的影响。图 6 仿真了不同绝缘电阻 R_g 导致极化谱的变化情况。

由图 6 可见, 主时间常数和极化谱的形状未发生变化。因此绝缘电阻的变化并不影响极化谱的主时间常数, 主时间常数可用于诊断绝缘的极化过程。

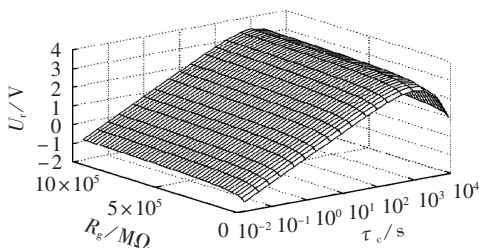
图 6 改变 R_g 的极化谱Fig.6 Polarization spectrum with varying R_g

图 7 仿真了不同几何电容导致极化谱的变化曲线。

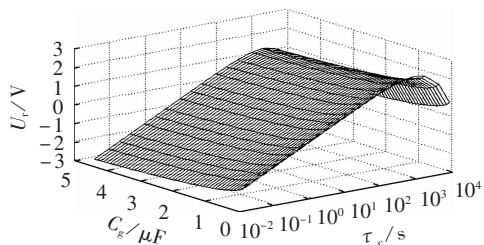


图 7 改变 C_g 的极化谱

Fig.7 Polarization spectrum with varying C_g

从图 7 中可以看到,随着几何电容的增加,回复电压值变小,而且曲线的形状和主时间常数仍然没有改变,由此可见,几何电容的变化也不会改变绝缘介质的主时间常数值。

对绝缘电阻和几何电容的仿真结果表明,如果保持充电电压 U_0 ,其他电路参数不变,仅绝缘电阻 R_g 降低,由于残余极化能量没变,导致绝缘电阻两端的电压,即回复电压值降低;而其他参数不变,仅几何电容 C_g 增加,则可以提高吸收极化电荷的能量,使得在放电一段时间后,去极化电流降低,导致回复电压减小。由此可见,绝缘电阻 R_g 和几何电容 C_g 主要影响回复电压峰值,对极化谱的主时间常数并没有影响,因此主时间常数可以诊断不同绝缘电阻和几何电容的变压器的绝缘状态。由于几何电容一般变化不大,因此,绝缘电阻是影响回复电压值大小的主要因素。

2.3 均一绝缘介质电路极化参数的仿真

保持等值电路中其他参数不变,仅改变 R_p 时的回复电压极化谱曲线如图 8 所示。

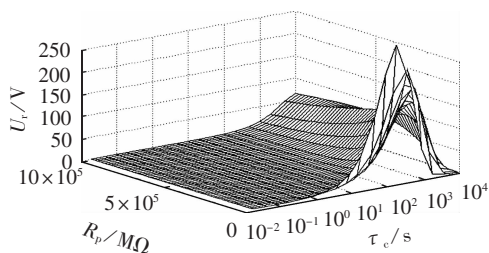


图 8 改变 R_p 的极化谱

Fig.8 Polarization spectrum with varying R_p

由图 8 可见,回复电压极化谱的主时间常数发生了变化,随着极化电阻的增加,松弛时间增长,因此,回复电压极化谱中峰值电压对应的充电时间增大。然而,随着极化电阻的升高,回复电压值反而有一定程度的降低。造成这一现象的主要原因是残余极化电荷一定的情况下,极化电阻的增加使得其两端的电压增大,而在绝缘电阻两端测试获得的回复电压自然就降低了。

图 9 仿真了电路中 C_p 的变化对极化谱的影响。

从图 9 可见,主时间常数依赖于 C_p 的值。如果改变并联电容 C_p ,极化时间将发生改变,因此,松弛时间也相应发生变化。而且,随着极化电容的增加,回复电压增加很快,这是因为极化电容的增加使得

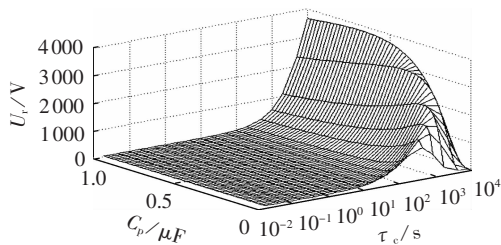


图 9 改变 C_p 的极化谱

Fig.9 Polarization spectrum with varying C_p

残余极化电荷量增加。因此极化电容的增加不仅增大了时间常数,而且增加了回复电压值。

仿真结果表明,如果保持相同 U_0 ,其他电路参数不变时,不同的 R_p 及 C_p 将改变极化时间,因此回复电压主时间常数也相应发生改变,同时也改变了回复电压峰值的大小。

2.4 均一绝缘介质时间常数变化的仿真

在实际绝缘中,等值电路中各个参数都可能发生变化,由于几何电容和绝缘电阻不影响松弛时间,因此,本文进一步研究了极化电路参数同时变化对极化谱的影响。电容值增加幅度一般小于电阻值降低的幅度,因此,松弛时间常数将会发生改变。图 10 为不同松弛时间常数 ($\tau = R_p C_p$) 下,均一绝缘介质响应电路仿真获得的极化谱。

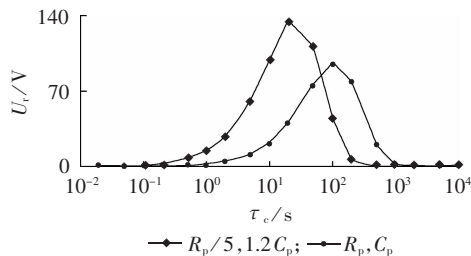


图 10 时间常数变化的极化谱

Fig.10 Polarization spectrum with varying time constants

从图 10 中可见,极化电容值增加 20%,极化电阻降低为原始值的 20% 时,绝缘系统的极化响应过程相对快速,在较短的时间内极化就能完全建立,获得回复电压最大值。这表明时间常数越小,意味着绝缘系统介电性能越差,具有高湿度含量或出现老化现象。相反,时间常数较大的绝缘系统,介质极化响应相对缓慢,只有在长时间充电作用下,才能使试品极化完全建立。

仿真结论 1: 回复电压最大值对应的充电时间越大,绝缘状态越好;反之,回复电压最大值对应的充电时间越小,绝缘状态越差,主时间常数可以有效诊断绝缘的状态。

3 复杂油纸绝缘系统的建模与仿真

3.1 复杂油纸绝缘系统的建模

均一绝缘介质响应电路的仿真直接表明了绝缘介质极化特性与回复电压特征量之间的关系。但是,对于油纸复合绝缘变压器,其内部存在多种不同松弛时间的极化过程。而且,在绝缘发生老化或受潮

时,也会产生新的松弛过程,其内部的松弛机制更加复杂,因此,单一德拜松弛时间函数的等值电路,难以反映其复杂的极化过程^[11-13]。而由于每个德拜松弛时间可以通过一个等值的 RC 串联电路来表示,因此,油纸绝缘系统的介质响应等值电路可使用 n 个不同 RC 串联支路并联来描述其极化特性中的多种松弛过程,一般称为基于扩展德拜模型介质响应等值电路。油纸变压器绝缘系统可被建模为如图 11 所示。

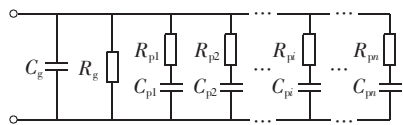


图 11 复杂绝缘系统介质响应等值电路

Fig.11 Dielectric response equivalent circuit of composite insulation system

在基于扩展德拜模型的介质响应等值电路中,各 RC 串联支路中的 R_{pi} 、 C_{pi} 是绝缘系统微观极化的宏观表现,不同的绝缘状态,其介质有着不同的 R_{pi} 、 C_{pi} 值。油纸绝缘系统中的松弛过程主要由绝缘油、绝缘纸、水分子、其他老化产物的极化以及多种夹层极化组成^[14-15]。本文仿真了多种极化过程并存的情况,建立了具有 6 组松弛元素仿真模型,它能基本反映油纸绝缘系统的复杂极化过程。

3.2 复杂介质响应等值电路参数的仿真

对于同一台变压器,绝缘状态良好时,其电容值较小,但电阻值较大;绝缘老化或受潮后,电阻值较小而电容值变大,也就意味着各个支路的时间常数变化并不大。在保持各个支路时间常数不变的情况下,改变支路参数,仿真分析了一台 110 kV 变压器电路参数变化对极化谱的影响。由于油纸绝缘变压器中缓慢极化过程主要是固体绝缘引起的,因此,本文主要仿真了时间常数大的支路参数变化对极化谱的影响。图 12 是基于 6 条松弛支路的介质响应等值电路中,2 条支路时间常数大于 100 s 的参数改变引起极化谱变化,极化谱的计算方法参见文献^[11,14]。

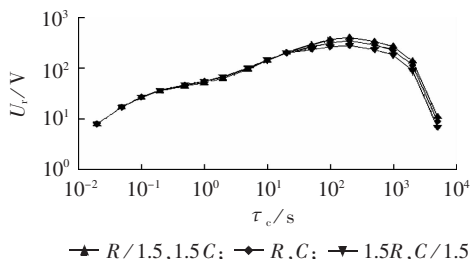


图 12 不同绝缘状态下回复电压谱的对比

Fig.12 Comparison of return voltage spectrum under different insulation conditions

图中, R 代表 2 条支路的极化电阻值, C 代表 2 条支路的电容值。由图 12 可见, 2 条支路时间常数大于 100 s 的参数的变化仅影响极化谱终端部分的回复电压值, 即绝缘纸板性能的改变主要影响大时

间常数支路的极化电阻和电容值, 它主要影响极化谱曲线的终端部分。因此根据极化谱终端部分的变化情况可以诊断固体绝缘的老化状态。

仿真结论 2: 缓慢极化过程主要影响极化谱的终端部分和其对应的回复电压值。绝缘状态差, 回复电压值大; 绝缘状态好, 回复电压值低。

3.3 仿真结果的应用

由仿真结论 1 和仿真结论 2 可知: 快速极化过程影响极化谱中充电时间较短的部分, 一般为极化谱的初始部分; 而缓慢极化过程主要影响极化谱的终端部分和其对应的回复电压值。因此这些结论可以用于分析具有 2 个峰值点的变压器 T_1 的回复电压测量结果。

由于变压器 T_1 测试前进行了充分放电, 排除了残余电荷干扰造成的峰值点; 而且在测试过程中绝缘介质温度稳定, 没有较大的温度变化, 也没有受到电磁环境的干扰。因此在排除外界环境干扰的情况下, 分析认为: 造成该极化谱 2 个峰值点的原因是绝缘内部受潮或老化程度不均一。根据其极化谱曲线分析, 第 1 个回复电压峰值对应的充电时间反映了快速极化过程, 主要是由绝缘油中的水分含量引起的, 因此该变压器出现了局部受潮现象; 第 2 个回复电压峰值对应的充电时间较长, 是固体绝缘缓慢极化过程引起的, 其对应的时间常数相对较大, 通过试验数据分析, 表明该时间常数对应的水分含量为 0.8%, 这表明固体绝缘状态仍然具有很好的绝缘特性。综合分析表明该变压器为绝缘内部出现了局部受潮和轻微老化现象, 该变压器干燥后可以继续运行, 但在运行过程中需要密切监视其绝缘状态。

4 结语

回复电压测量方法是一种有效的变压器固体绝缘的诊断方法, 其极化谱和回复电压特征量能反映出绝缘系统的老化状态。仿真分析结果表明, 回复电压特征量的主时间常数能诊断不同几何电容的变压器的绝缘状态, 是一个有效的诊断绝缘状态的特征量, 而且极化谱终端部分的波形和回复电压特征量主要反映固体绝缘的老化状态, 极化谱的形状也是诊断绝缘状态的有效特征量, 因此, 理论分析的结果可以有效指导变压器绝缘状态的评估。

参考文献:

- [1] HOMACK C, LEIBFRIED T. Practical experience on transformer insulation condition assessment[C]//8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Bali, Indonesia: IEEE, 2006: 238-241.
- [2] GIELNIAK J, OSSOWSKI M. Dielectric response of oil-paper insulation systems of large moisture and temperature inhomogeneity[C]//Proceedings of the 14th International Symposium on High Voltage Engineering. Beijing, China: Tsinghua University, 2005: 25-29.
- [3] 张涛, 蔡金铨, 张孔林. 电压响应方法在电力变压器状态评估中

- 的应用[J]. 高电压技术,2008,34(12):2674-2680.
- ZHANG Tao,CAI Jinding,ZHANG Konglin. Application of voltage response method for condition assessment of power transformer[J]. High Voltage Engineering,2008,34(12):2674-2680.
- [4] ZAENGL W S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment,part I:theoretical considerations[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2003,19(5):5-19.
- [5] SAHA T K,PURKAIT P. Understanding the impacts of moisture and thermal ageing on transformer's insulation by dielectric response and molecular weight measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(2):568-582.
- [6] 李明华,董明,严璋. 一种新的绝缘测试方法——回复电压法[J]. 高电压技术,2002,28(8):43-45.
- LI Minghua,DONG Ming,YAN Zhang. A new insulation testing method—return voltage method[J]. High Voltage Engineering,2002,28(8):43-45.
- [7] 张涛,蔡金锭. 应用极化谱分析油纸变压器绝缘纸板水分含量的研究[J]. 电工电能新技术,2009,28(4):46-49.
- ZHANG Tao,CAI Jinding. Research on moisture content analysis of insulation pressboard in oil-paper transformer using polarization spectrum[J]. Adv Tech of Elec Eng & Energy,2009,28(4):46-49.
- [8] BIRLASEKARAN S,YU Xinzhou. Relaxation studies on power equipment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2003,10(6):1061-1077.
- [9] LEIBFRIED T,KACHLER A J,ZAENGL W S,et al. Ageing and moisture analysis of power transformer insulation systems[C] //Proceedings of CIGRE Session. Paris,France:[s.n.],2002:12-101.
- [10] 宋伟,KACHLER A J. 变压器老化评估的极化去极化电流分析法[J]. 变压器,2005,42(7):29-33.
- SONG Wei,KACHLER A J. Polarization current analysis for transformer aging assessment[J]. Transformer,2005,42(7):29-33.
- [11] JOTA P R S,ISLAM S M I,JOTA F G. Modeling the polarization spectrum in composite oil/paper insulation systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1999,6(2):145-151.
- [12] SAHA T K,PURKAIT P. Understanding the impacts of moisture and thermal ageing on transformer's insulation by dielectric response and molecular weight measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(2):568-582.
- [13] BIRLASEKARAN S,LEDWICH G,MATHEW J. Relaxation studies to identify aging with oil filled transformers:experiments [C] //The 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Harbin,China:IEEE,2009:301-306.
- [14] 张涛,蔡金锭. 油纸绝缘变压器介质响应电路参数辨识的研究[J]. 电工电能新技术,2010,29(4):35-39.
- ZHANG Tao,CAI Jinding. Research on parameters identification for dielectric response equivalent circuit of transformers oil-paper insulation[J]. Adv Tech of Elec Eng & Energy,2010,29(4):35-39.
- [15] SAHA T K,YAO Z T. Experience with return voltage measurements for assessing insulation conditions in service aged transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2003,18(1):128-135.

(编辑: 柏英武)

作者简介:



江修波

江修波(1960—),男,福建福清人,副教授,主要从事电气设备检测和电力变压器绝缘老化测试研究(E-mail:jiang_fzu@yahoo.com.cn);

张涛(1981—),男,安徽阜阳人,讲师,主要从事电气设备绝缘状态诊断研究;

黄彦婕(1986—),女,福建漳州人,硕士研究生,主要研究方向为变压器油纸绝缘系统的老化诊断。

Simulation of transformer insulation polarization spectrum

JIANG Xiubo¹,ZHANG Tao²,HUANG Yanjie¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation,Fuzhou University,Fuzhou 350002,China;

2. Electrical Engineering and Renewable Energy School,
China Three Gorges University,Yichang 443002,China)

Abstract: The return voltage measurement can effectively detect the moisture content of solid insulation in transformer, but it is difficult to get the definite diagnostic results from the return voltage polarization spectrum with local peaks. The theory of extended Debye model is introduced, the relationship among insulation polarization, aging process and equivalent circuit parameter is established, and the variation law of characteristic variables and polarization spectrum induced by the variation of electric parameters are simulated and analyzed. Simulative results show that, the dominant time constants can diagnose the insulation conditions of transformers with different geometric capacitances, which is an effective characteristic variable. The shape of polarization spectrum is also an effective characteristic variable of insulation diagnosis. The shape of its terminal part and its return voltage can reflect the aging condition of solid insulation. Test results validate the effectiveness of simulation conclusions.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province(2010J01283).

Key words: return voltage; insulation diagnosis; aging; power transformer; polarization spectrum