

变压器油纸绝缘结构回复电压测量系统的研制

回复电压法是目前国内外常用的一种无损的绝缘检测方法。绝缘材料在直流电压下发生极化现象，回复电压法就是利用油纸绝缘结构的极化特性测量其极化曲线得到特征参数，从而对变压器绝缘受潮和老化的状态进行诊断。基于Debye模型对油纸绝缘结构的老化模型进行了仿真研究，结果表明不同的充电电压和充放电时间并不会影响回复电压曲线的变化趋势，而绝缘电阻值的变化，改变了曲线的变化趋势。设计并完成了基于介质极化理论对变压器绝缘现场检测具有实际应用价值的纸绝缘结构回复电压测试系统。

孙长海 杜嘉林/大连理工大学电气工程学院

钟俊涛/特变电工沈阳变压器集团有限公司

刘湘莅 宋文卓/国网河南省电力公司经济技术研究院

0 引言

变压器是电力系统的核心，在长期服役的过程中，其机械寿命和电气寿命受到工作条件的影响急剧下降，因此对变压器的老化状态诊断一直是国内外学者研究的重要课题。变压器的固体绝缘主要是纸板，纸板的主要成分是纤维素，而纤维素具有不可逆的老化特征。绝缘纸板在水分的催化作用下加速了纤维素的老化过程，使纤维素的分子链加速断裂，体现在纸板聚合度（DP）的降低，从而降低结构的绝缘性能^[1]。因此，对变压器绝缘老化程度和剩余寿命的评估具有十分重要的实际应用意义。

目前，对变压器油纸绝缘状况诊断的常用方法主要有有色谱分析（DGA）、聚合度测定、油中糠醛测定及纤维纸板拉伸强度测试等。除此之

外，计算机X线体断层扫描（CT）和核磁共振（NMR）等技术也开始应用到变压器故障诊断的领域中^[2-6]。

最近几十年国内外学者提出了一些以介电响应理论为基础且不破坏变压器绝缘结构为前提的无损诊断方法^[7]，如频域介电谱法（FDS）和基于截至极化理论的极化去极化电流法（PDC）以及本文介绍的回复电压法（RVM）。RVM是利用绝缘材料的极化特性，测得回复电压曲线从而得到可以反映评估变压器老化和绝缘受潮的参数，进而对变压器的总体状态作出综合的诊断。RVM检测技术除非破坏性外，还具有很多优点，如：包含信息多、抗干扰能力强、灵敏度高且易于现场测试等^[8]。

在国内外学者对RVM的研究中，目前公认可以表征变压器绝缘老化状态的回复电压参数包括初始斜率（ S_i ）、回复电压峰值（ U_{rmax} ）和中心时间常数（ t_{cdom} ）^[9]。本文中设计的回复电压测试系统正是对上述三个特征参数进行提取，从而对变压器的绝缘水平进行整体评估。

1 测试原理

1.1 介质极化理论

绝缘介质在外加电场的作用下会产生复杂的极化现象。极化现象分为电子式极化、偶极子式极化、夹层极化和空间电荷极化，其中后三种极化方式对介质的老化和受潮具有较高的灵敏度^[10]。



孙长海/教授级高工

关键词/Keywords

回复电压·
油纸绝缘·
德拜模型·
状态评估·

辽宁省科技创新重大专项：特高压直流接入750 kV
交流换流变压器研制（2015080003-202）。

由此,给绝缘介质持续施加一个直流电压,其内部偶极子在直流电场的作用下会发生极化现象,同时介质表面出现束缚电荷,将介质短接,释放表面的束缚电荷同时介质内部发生去极化过程,在去极化过程进行中,介质两端会产生一个电动势差—回复电压^[11]。

1.2 RVM测试原理

RVM测量的电路原理如图1所示,根据测试过程中开关动作的位置,一个测量周期可分为四个阶段,包括极化阶段、去极化阶段、测量阶段和放电阶段^[12]。

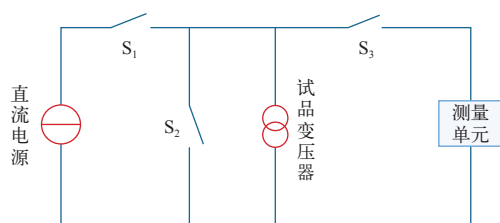


图1 RVM测试原理图

1) 极化阶段。 S_1 接通, S_2 、 S_3 断开,使绝缘系统充电 t_c 时间。

2) 去极化阶段(释放表面电荷)。 S_2 接通, S_1 、 S_3 断开,停止充电并短接两极使被试绝缘系统放电 t_d 时间,一般规定 $t_d = t_c/2$ 。

3) 测量阶段(继续去极化过程)。在放电 t_d 时间后,撤去短接线,使 S_1 和 S_2 断开, S_3 接通,连续测量被试品两端的电压,直到回复电压达到峰值 U_{rmax} 后衰减到零,由此得到 $U_r = f(t)$ 关系曲线。

4) 放电阶段。 S_1 、 S_3 断开, S_2 接通,短接两极,彻底放完绝缘试品上剩余电荷,开始下一个试验周期。

测试系统等效电路如图2所示。对被试变压器经过 t_c 充电,图2a为极化阶段被试变压器上的充电电压,在时间 $t < t_c$ 时间内,变压器内部的油纸结构开始发生极化现象。在图2b去极化阶段 t_d 的时间内,时间常数 $T_{pi} < t_d$ 极化过程产生的极化电荷全部泄放;而时间常数 $T_{pi} > t_d$ 极化过程产生的电荷并没有完全泄放,仍处于激活状态。在图2c的测量阶段,这些极化电荷开始放电,从而形成回复电压,回复电压峰值 U_{rmax} 可以表征介质的极化特性。

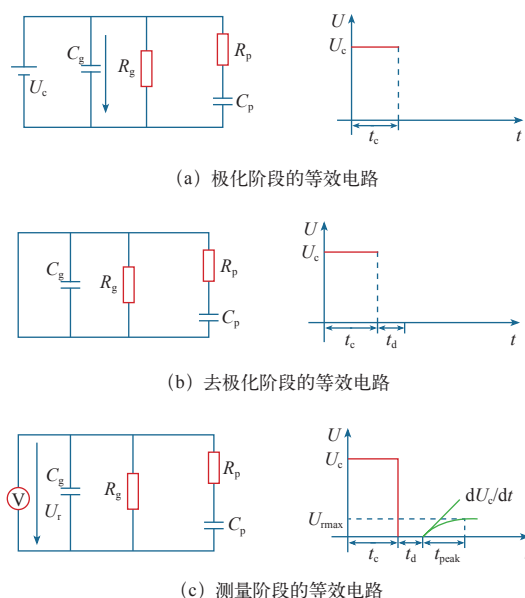


图2 测试系统等效电路及回复曲线

经过多次回复电压测试,得到极化谱(以充电时间 t_c 为横轴, U_{rmax} 为纵轴所得到的曲线)。通过对极化谱的分析,可以对变压器的绝缘状态进行一定的评估。

2 基于Debye模型的回复电压仿真分析

研究表明,松弛极化会随着绝缘油纸老化程度的变化而发生改变^[13],为了能够更加明确地研究油纸绝缘结构的松弛极化现象,学者们提出了很多油纸绝缘结构的等效电路,其中通过多支路电阻电容串联的Debye模型被广大研究人员所认可并验证有效。图3为基于Matlab软件的Debye模型仿真得到的曲线,其中曲线1与曲线2为施加不同的充电电压;曲线2和曲线3为不同的充放电时

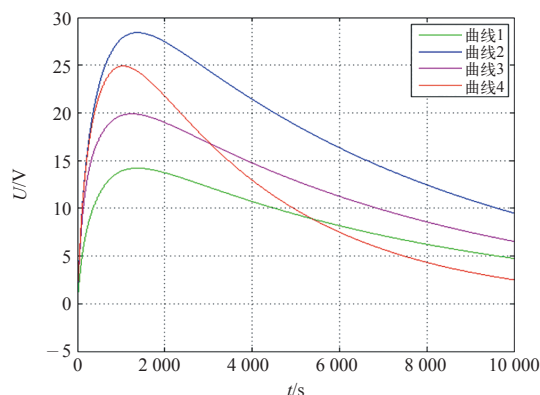


图3 回复电压仿真曲线

间；曲线2和曲线4为不同的绝缘电阻。由于研究表明，变压器随着投入运行时间的增加，绝缘油纸老化会产生水、酸和呋喃等极化物质^[14]，从而提高绝缘油纸的电导率，降低绝缘电阻，而几何电容是与变压器的结构设计、容量相关，在变压器设计完成后几何电容是不发生变化的^[15]，所以本文中并没有作对不同电容值的仿真。

通过对仿真曲线的对比，可以得出下述内容。

1) 不同的充电电压不会影响回复电压曲线的整体趋势，只改变整体的电压幅值。

2) 不同的充放电时间同样不会影响回复电压曲线的整体变化趋势，但影响了最大回复电压 U_{rmax} 和中心时间常数 t_{cdom} 。

3) 不同老化程度（绝缘电阻不同）的回复电压曲线发生了本质的变化。

综上所述表明，回复电压曲线可以作为变压器绝缘检测以及寿命评估的一种无损方法。通过对充电电压和充放电时间的合理选择，可以较为准确地找到反映绝缘情况的状态参量，是具有广阔应用前景的现场检测变压器绝缘状态的方法。

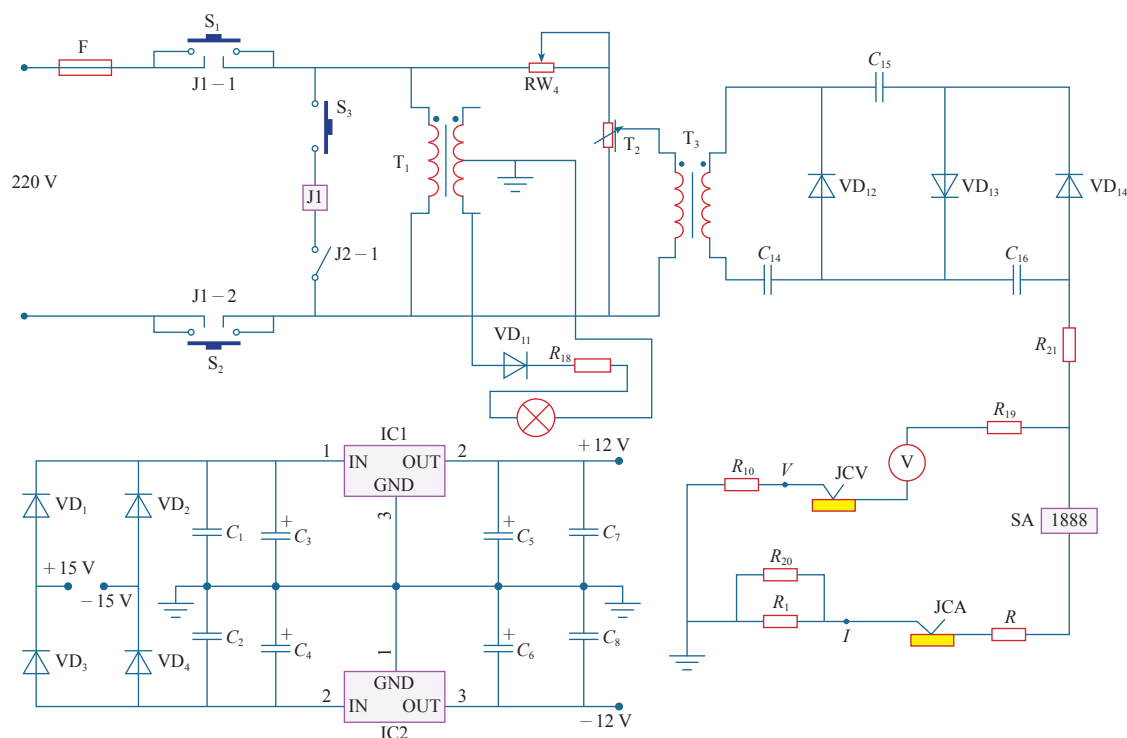
3 回复电压测试系统

3.1 直流电源

本文中回复电压测试系统的高压直流电源0~4 kV连续可调，其电源电路如图4所示。其中图4a的电路是电源的主电路，包括起动、停止、零位按钮和工作指示灯等。其中IC1和IC2分别是7812和7912，配合其周围电路产生稳定的±12 V直流电，作为其他芯片和检测设备的电源供电。图4b为电源的保护电路，对电源的过电流、过电压进行保护动作。其中电流保护是利用LEM电流传感器进行电流采样，通过比较放大器IC3和IC4控制三极管BG的导通状态来达到保护的（其中电阻 RW_1 是用来调整电流保护动作的起始阈值）；电压保护同理，是通过采样电阻再经过IC5和IC6控制晶体管BG的导通状态（其中 RW_2 用来调整电压保护动作起始阈值）。

3.2 开关控制单元

由回复电压的测试原理可知，需要对被试变压器的充电和放电过程进行控制，开关控制电



(a) 电源主电路

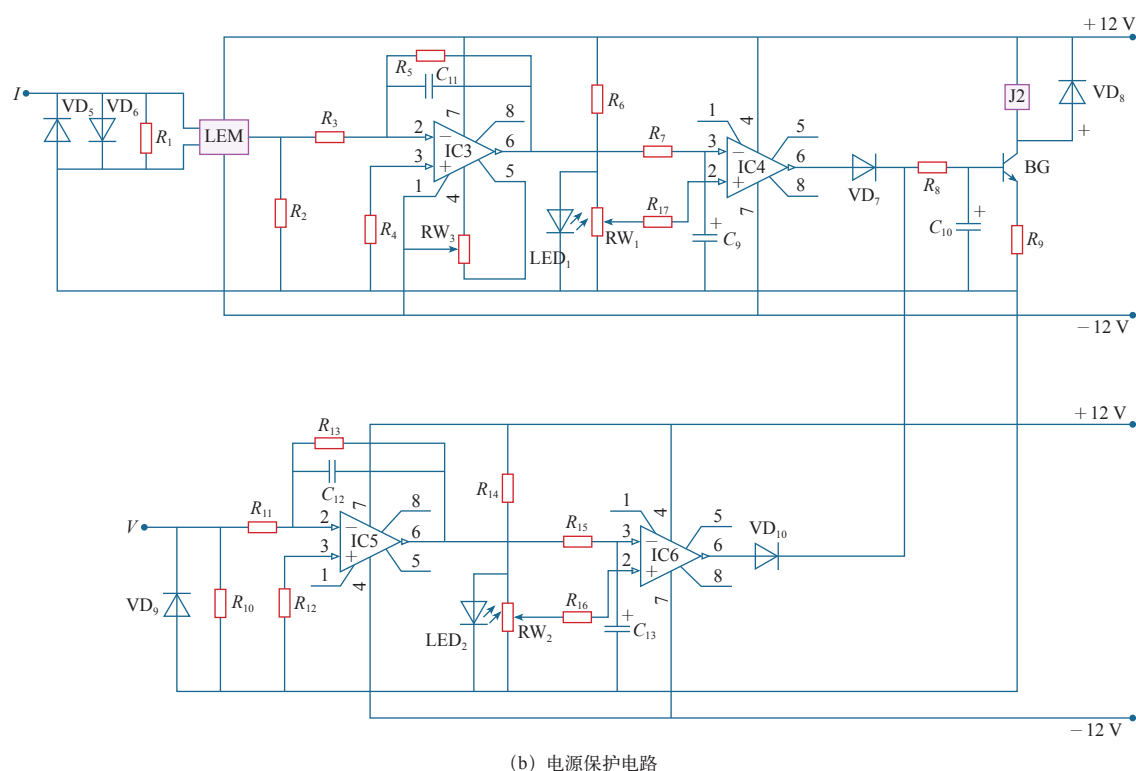


图4 高压直流电源电路

源就是实现对充电时间和放电时间进行设定。本文设计的回复电压试验系统的控制开关选用继电器来实现，由于一般的继电器耐压等级较低，无法承受长时间的高压直流电场，而本系统要求最高在2 500 V的直流电压下运行，所以必须选用合适的高压继电器。本文选用的是沪工JT-5-H/027-Z型真空高压继电器，其最高可承受的直流耐受电压为20 kV，远远大于系统的试验电压，满足设计要求。

充放电时间的控制，采用TMC5X-B数字型的时间继电器，其时间设定范围在0.01~9 999 s，完全满足设计需求。通过时间继电器和真空高压继电器之间的动作配合最终实现被试变压器的充放电过程。

3.3 滤波单元

由于变压器各级绕组之间存在杂散电压的影响以及测试环境的干扰，为了提高测得波形的准确性，在测量端前需加入滤波器，排除杂波信号。本文选用集成的50 Hz工频陷波器F42N50及其外围电路组成，其电路原理图如图5所示。

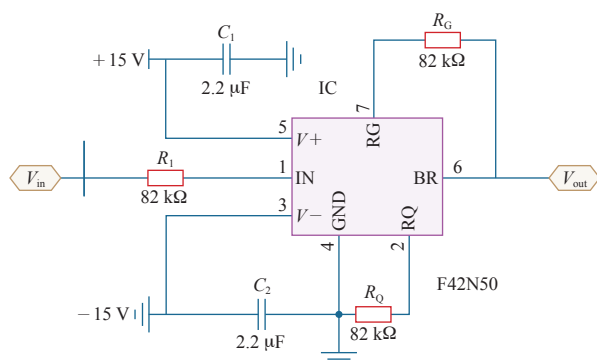


图5 由F42N50及外围元件组成的工频陷波电路

3.4 采集单元

考虑到数据采集的准确性以及抗干扰能力，本试验系统采用普源DS1074Z示波器对数据进行采集。DS1074Z示波器可以通过串口通信与PC机进行数据传输，数据采集软件，图6为数据采集界面，基于LabVIEW可实时显示，并可将数据存储为.xls文件，供其他工具进行数据读取和处理。再利用Matlab对采集所得到的数据进行处理，绘制出完整的回复电压曲线，并计算出最大回复电压 (U_{rmax})、初始斜率 (S_i) 和中心时间常数

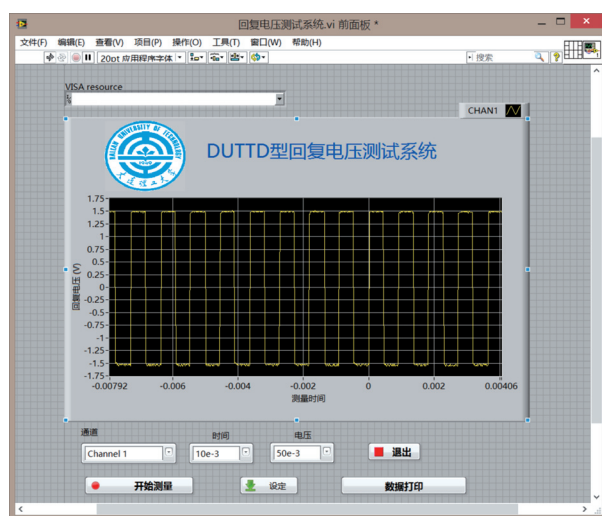


图6 采集系统界面

(t_{cdom}) 三个特征值。

4 应用

由于回复电压信号比较小, 因此不仅要在硬件设计上作好抗干扰处理, 测量时适当的接线也可以达到最大程度地滤除干扰信号的目的。本文建议的处理如下。

1) 保证测量时环境温度恒定, 建议不要在绝缘材料温度低于8℃时进行测试。

2) 确认被试变压器处于离线状态, 并将高压侧和低压侧短路接地, 保证接地放电15 min以上。

3) 将高压侧接地并与测试系统的正极相连, 低压侧与负极相连, 并保证回复电压测试系统接地端可靠接地。

对不同绝缘状态的60 kV变压器进行了测试, 其中1#试品为新变压器, 2#试品为有漏油故障的变压器, 3#试品为人工受潮的变压器, 4#试品为老化的变压器, 得到的回复电压测试曲线如图7所示。从测得曲线可以得知: 随着变压器的老化, 回复电压峰值(U_{rmax})会随之增大, 中心时间常数(t_{cdom})会减小; 而初始斜率(S_i)受变压器内部微水含量的影响比较明显。

通过对试验变压器绝缘状态的检测分析, 本测试系统所采用的方法可以对变压器的绝缘状态进行有效的评估。

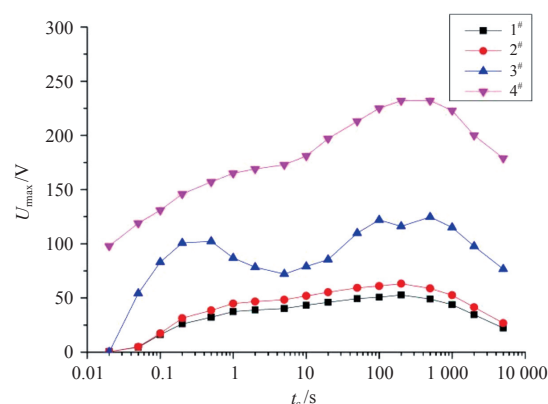


图7 不同绝缘状态变压器的RVM曲线

5 结束语

基于介电响应理论, 深入研究变压器的无损检测方法中的RVM, 并得到以下结论。

1) 扩展Debye模型可以用来模拟不同极化程度的油纸绝缘系统的RVM过程, 因此不同老化状态下的RVM测试结果可以有效地评估变压器整体的绝缘状态, 并较为准确地反映绝缘破坏的详细信息。

2) 设计研制的回复电压测试系统, 可以完成对变压器回复电压曲线的采集, 并对曲线中的特征参数进行计算和显示。实现了变压器绝缘特性的自动检测, 提高了测试的安全性, 并可以完成变压器油纸绝缘状态的评估, 具有一定的实际应用价值。

3) 通过研制的回复电压测试系统对新变压器试品、漏油故障的变压器试品、人工受潮的变压器试品及老化的变压器试品进行回复电压曲线的测试, 表明随着变压器老化程度的加深, 回复电压最大值和初始斜率随之增加, 中心时间常数则随之减小, 并且初始斜率受含水量的影响较为明显。

参考文献

- [1] Emsley A M, Stevens G C. Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers [J]. IEEE Proceedings-Science Measurement and Technology, 1994, 141 (5): 324-334.
- [2] 王学磊, 李庆民, 杨芮, 等. 基于油色谱分析的

- 变压器复合绝缘缺陷多指标综合权重评估方法[J]. 高电压技术, 2015 (11): 3836-3842.
- [3] 李军, 董立文, 赵红. 油浸式变压器的老化和寿命评估[J]. 高电压技术, 2007 (3): 186-187, 189.
- [4] Zheng Xu, Robert H Morris, Martin Bencsik, et al. Detection of virgin olive oil adulteration using low field unilateral NMR[J]. Sensors, 2014 (14): 2028-2035.
- [5] 张雅洁. 电力用油劣化状态在线监测的核磁共振方法及传感器设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [6] N'cho J S, Fofana I, Hadjadj Y, et al. Review of physicochemical-based diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers[J]. Energies, 2016, 9 (5): 367.
- [7] Omar Hassan, Hossein Borsil, et al. Diagnostic of insulation condition of oil impregnated paper insulation system with return voltage measurements[C]. 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation And Dielectric Phenomena, 2003: 53-156.
- [8] 刘刚. 变压器油-纸绝缘状态诊断的回复电压法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [9] 廖瑞金, 孙会刚, 袁泉, 等. 采用回复电压法分析油纸绝缘老化特征量[J]. 高电压技术, 2011 (1): 136-142.
- [10] 林国梁, 蔡金锭, 李天友. 变压器绝缘介质恢复电压的测量和研究[J]. 电力设备, 2007 (10): 37-40.
- [11] 申翰林. 基于回复电压法的油浸式变压器状态检测关键技术的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [12] 高宗宝. 基于回复电压法的变压器油纸绝缘状态研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [13] Li Anna, Cai Jinding. Equivalent circuit parameter identification and aging assessment for oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21 (3): 1368-1375.
- [14] 段宗超, 吴广宁, 高波. 油纸绝缘频域介电谱特性与聚合度的关联影响规律研究[J]. 电网技术, 2014 (10): 2881-2887.
- [15] 江贵贵. 变压器油纸绝缘状态检测的回复电压法应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- (收稿日期: 2017-04-08) **EA**

(上接第46页)

试验接线方式与常规产品不同, 属于特殊试验, 试验方法和试验场地空间问题是制造过程中的主要难点, 需要制定完善的试验方案。

2) 经雷电冲击计算可知, 在串联变压器高压线圈S、L端施加全波冲击电压时, 将在串联变压器高压线圈中部和励磁变压器高压线圈1中部产生一个较高的振荡过电压, 其峰值电压为施加电压峰值的1.4倍。

3) 本台变压器中, 串联变压器高压线圈的最大油道梯度电压位于线圈下半部分, 数值为6.64% (63.08 kV); 励磁变压器高压线圈1的最大油道梯度电压位于线圈上半部分, 数值为8.11% (77.12 kV), 按照以往类似电压产品的设计生产经验, 绝缘结构均能满足要求。

综上所述, 本台产品中, 串联变压器和励磁变压器中各线圈的绝缘结构强度均能满足要求。此外, 由于双心式PST绝缘结构的复杂性, 在进行PST绝缘结构设计时, 需要着重考虑该过电压对线圈内部线匝、线圈之间、油箱以及连接引线的影响, 确保绝缘性能的可靠性。

参考文献

- [1] 路长柏. 电力变压器绝缘技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1997.
- [2] 李文平, 陈志伟. 出口美国大容量移相变压器的研究[J]. 电力设备, 2007, 8 (8): 21-23.
- [3] 陈志伟, 李志伟, 李文平. 浅谈大容量移相变压器的设计[J]. 变压器, 2014, 51 (2): 1-4.

(收稿日期: 2017-05-03) **EA**