

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.06.030

# 变压器油纸绝缘 RVM 现场测试技术研究

鄢仁武

(福建工程学院信息科学与工程学院, 福州 350108)

**摘要:** 结合现场试验,详细分析了回复电压试验的注意事项及影响因素,重点阐述和剖析了环境温度、残余电荷、强电磁场等现场因素对恢复电压测试法(return voltage measurement,RVM)测量结果的影响,以及消除或减弱这些因素影响的方法,以提高 RVM 方法对变压器绝缘优劣评估的准确性。

**关键词:** 恢复电压; 绝缘评估; 介电特性; 现场因素

## Review on Field RVM Technology of Transformer Oil-paper Insulation

YAN Renwu

(School of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** According to the results of the field return voltage measurement (RVM) technology, the precautions and influencing factors on the RVM technology are described. Emphases are put on the on-the-spot factors influencing RVM results, such as ambient temperature, residual charges, and strong electromagnetic field, and the countermeasures against the influences of these factors. The purpose of this study is to improve the accuracy of the RVM technology for assessing insulation condition of transformers.

**Key words:** return voltage; transformer insulation assessment; dielectric properties; on-the-spot factor

## 0 引言

恢复电压测试法(return voltage measurement, RVM)<sup>[1]</sup>是近年来国外研究较广泛的一种评估油纸绝缘状况的新方法。该方法已在美国、瑞士、澳大利亚等国家得到了论证<sup>[2-6]</sup>,并应用到电力电缆和电力变压器绝缘状况的现场测试中<sup>[7-9]</sup>。国内也已将此方法应用于电力变压器、电缆等的绝缘测试。由于国内该方法研究应用工作开展不久,仍需要不断地积累现场经验,以便正确地使用恢复电压法。

绝缘材料的老化和水分的存在都会引起绝缘介质中带电粒子及夹层特性改变,介质极化特性也随之变化,因此通过监测介质极化特性可以评估变压器绝缘状况<sup>[1]</sup>。恢复电压测量技术是一种相对较新的介质极化特性响应测试方法,该方法通过对介质

进行一系列不同充放电时间常数的试验,获得反映介质极化特性的参量,进而评估介质的绝缘状况,实现油纸绝缘状况无损监测。恢复电压测试法具有不用内部取样、灵敏有效、现场操作简便等优点,从而适用于电力变压器的现场诊断<sup>[10-11]</sup>。

在现场测试过程中,RVM 测试结果会受到一些现场因素的干扰,这将会影响到变压器油纸绝缘状态评估的准确性,因此,有必要分析影响恢复电压测量的现场因素<sup>[12-13]</sup>。两年多来,通过对大量变压器进行 RVM 试验,积累了一定的现场经验,文中将分析若干现场因素的影响作用。

## 1 恢复电压测试法

### 1.1 测试原理

RVM 是基于时域极化响应理论的一种分析诊断方法,RVM 的一个测试循环见图 1。开始充电之

收稿日期:2014-11-22; 修回日期:2014-12-26

**基金项目:**“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAF12B15);福建省高校产学研合作科技重大项目(2010H6002);福建省自然科学基金项目(2012J05107);福建省教育厅科技项目(JA12230);福建工程学院基金项目(GY-Z10053、GY-Z11070)。

Project Supported by Key Projects in the National Science & Technology Pillar Program During the Twelfth Five-year Plan Period (2012BAF12B15), Major Production Study Cooperation Science and Technology Project of Fujian Province (2010H6002), Natural Science Foundation of Fujian Province of China(2012J05107), Educational Commission of Fujian Province of China(JA12230), Foundation of Fujian University of Technology(GY-Z10053, GY-Z11070).

前,绝缘介质必须已彻底放电,将一直流阶跃电压施加在绝缘介质两端之间,进行充电,绝缘介质将被极化。经过  $t_c$  的充电时间后,撤去施加电压,将绝缘介质两端短接进行放电,绝缘介质去极化,部分电容电荷被释放。经过  $t_d(t_d=t_c/2)$  的放电时间后,在开路情况下测量绝缘介质两端间的电压,由于残余极化电荷仍然存在,被极化的束缚电荷将转变为自由电荷,自由电荷会在电极之间呈现一个电势差,即恢复电压(RV)。记录恢复电压最大值,然后再将绝缘介质两端充分短路,继续去极化过程,使绝缘介质尽量恢复至初始的状态,为下一个测试循环做好准备。

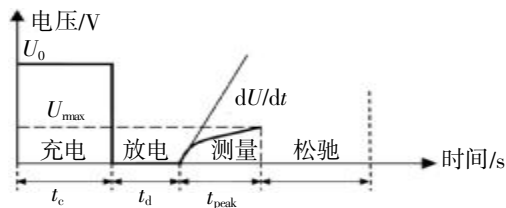


图1 RVM的一个测试循环

Fig. 1 A test cycle of return voltage measurement method

## 1.2 测试结果分析

极化谱中,峰值时间常数与绝缘介质受潮老化程度密切相关<sup>[8-9]</sup>,在一定温度下,恢复电压极化谱的峰值点越往左偏移,介质绝缘状态就越差;相反,峰值点越往右偏移,要经过更长的充电时间才会出现峰值点,则表明介质绝缘状况越好,如两台投产时间不同的变压器测试现场温度均为35℃,施加直流电压为2000V,充放电时间比为2,利用RVM5461型测试仪测得的极化谱见图2。

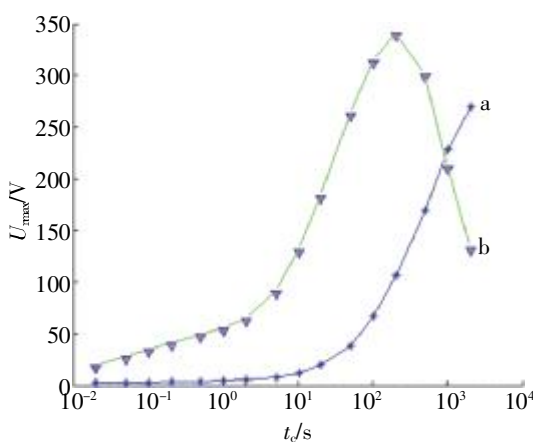


图2 两台变压器极化谱对比

Fig. 2 Polarization spectrum of two transformer

图2中:a线对应一台刚投产的220kV/240MV·A变压器A,测量到2000s点,尚未出现峰值点,绝缘状况良好;b线为一台投产10a的110kV/31.5MV·A变压器B的极化谱,其峰值时间常数为200s,则可判断其出现一定程度的老化现象,所以峰值时间常

数随微水体积分数增加和老化加剧而降低<sup>[9]</sup>,峰值时间常数能反映出变压器的总体绝缘状态,通过峰值时间常数可判断其绝缘状况。

## 2 影响RVM的现场因素

对于有唯一峰值点的极化谱曲线,通过峰值时间常数便可合理地估测其绝缘介质的健康状况<sup>[8-9]</sup>。然而,在现场测试过程中,恢复电压会受到变压器的一些外在因素的影响,如温度变化、残余电荷过大、电磁场干扰等,这些影响将会使测试结果出现偏差,如极化谱出现多个局部峰值点,从而给设备绝缘健康状况判断带来不便,因此必须设法消除或减少这些干扰因素的影响。笔者依照现场经验,对测试过程中可能出现的问题进行了分析。

### 2.1 温度的影响

绝缘介质的极化特性与温度有关,绝缘介质温度升高后,极化过程中载流子数目增加且运动更频繁。现场测试结果也表明,温度会影响RVM测试结果,如一台变压器分别在24、45、65℃温度下进行RVM测试<sup>[14]</sup>,极化谱的峰值及其时间常数与温度的关系见图3。从图3中可看出随着温度的升高,恢复电压极化谱的峰值向左移动,峰值时间常数变小,同一变压器在高温时的峰值时间比低温时小,初始斜率也增大。因此,在RVM测试过程中的温度差异大,会造成极化谱出现偏差,所以在测量过程中要记录环境温度和变压器本体油温,以保证试验数据的可靠性。

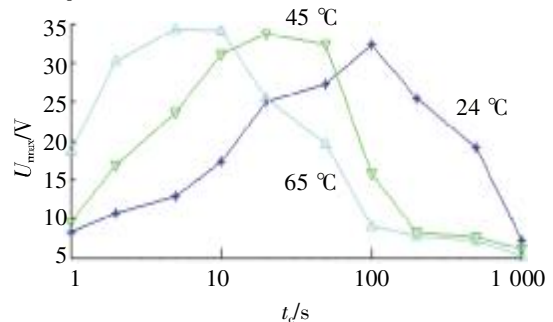


图3 测试温度对极化谱的影响

Fig. 3 Effect of test temperature on polarization spectrum

变压器在正常运行时,内部温度会比周围环境高,RVM测试前必须有足够的时间使其温度降低到周围环境温度,确保测试过程介质温度变化尽可能小。由于极化谱随温度的变化可近似描述为极化谱曲线沿着充电时间  $t_c$  轴的转移,当温度变化较大时,可按式(1)进行温度折算,将测试数据换算到同一温度,以纠正极化谱曲线,从而提高RVM评估的可靠性。

$$t_c \text{ at } T_2 = t_c \text{ at } T_1 \exp(-aT) \quad (1)$$

式(1)中: $t_{c \text{ at } T_1}$  为  $T_1$  温度条件下的充电时间; $t_{c \text{ at } T_2}$  为折算到  $T_2$  温度条件下的等效充电时间; $T$  为温度差; $a$  为温度换算系数。

式(1)的有效性已在文[15]中得到验证和应用。

## 2.2 残余电荷的影响

多台变压器测试结果均表明,测试前进行过的其他测试实验,或强迫油循环的油流静电等都会使变压器存在残余电荷,特别是大容量变压器更容易有残余电荷。当充电周期较小时,由于极化时间短,恢复电压小,残余电压叠加到恢复电压上,使测得的恢复电压值虚假变大或减小。随着充电时间的增长,恢复电压将逐渐提高,残余电荷对恢复电压的影响将逐渐减弱,从而形成了一个或多个“虚假”峰值点,导致极化谱出现多个局部峰值点<sup>[16]</sup>。对于大容量变压器由于残余电荷的影响可能出现图 4 所示的波形,即残余电荷电压可能比恢复电压的最大值高,但是测试仪器却自动将最高电压  $U_{\max}$  看成是最大恢复电压  $U_{\max}$ ,导致错误的测试结果。

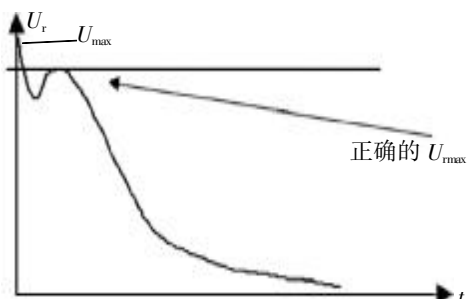


图 4 大容量变压器可能出现的恢复电压波形

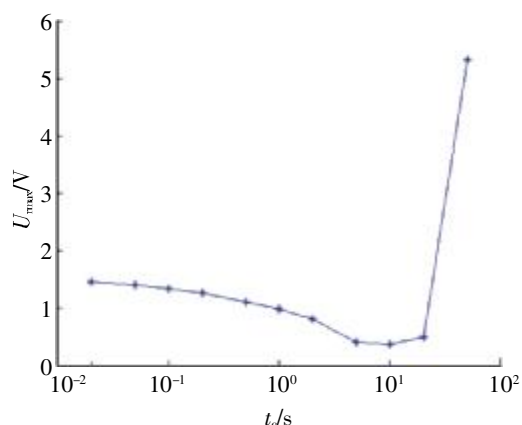
Fig. 4 Possible return voltage of high-capacity transformer

图 5(a)为某供电局一新投变压器中压侧的极化谱前 100 s,由于变压器中存在一定的残余电荷,受其影响,在 0.02 s 就出现一个恢复电压峰值点;将变压器通过短路接地泻放掉残余电荷后,所测得极化谱见图 5(b)。测试前对试品进行充分的放电,可避免绝缘系统中残余电荷的影响。现场试验时,对于电容量较大的试品要经过 15~30 min 的放电,再测量其短路电流,如果短路电流比较大,说明残余电荷仍较大,需要继续短路放电。随着短路时间的推移,短路电流通常会逐步变小或者维持在某一允许值之下。

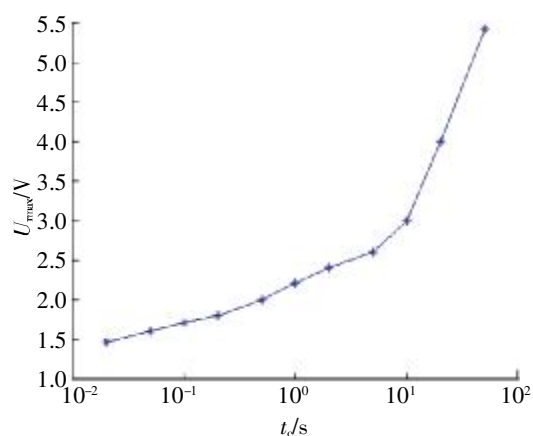
由此也可看出,为消除残余电荷的“累积”效应,有必要逐渐增加 RVM 充放电时间,可采用 1~2~5 步长增加充放电时间。要消除残余电荷的影响,除了测试前充分放电,也可适当提高充电电压。对于大容量变压器,可从较大的充电时间(如 0.2 s)开始进行 RVM 测量,可以消除或避免残余电荷的影响<sup>[17-18]</sup>。

## 2.3 电磁场干扰的影响

在 RVM 的一个测试循环中,恢复电压一般按



(a)受到残余电荷影响



(b)充分放电后

图 5 受到残余电荷影响及充分放电后测得的极化谱

Fig. 5 Residual charge affected & fully discharge polarization spectrum

照一定的速度先持续增大,后逐渐衰减。如果出现大的异常波动,则说明测试环境存在不稳定因素。从 RVM 的测试原理和现场实测情况看,如果在强电场附近测量恢复电压,由于被试品与带电设备(或母线)之间存在着耦合电容,被试品通过测量回路接地,所以耦合电容电流便可通过测量回路,形成干扰电流,使恢复电压的曲线异常波动,见图 6。油纸绝缘变压器的恢复电压峰值一般都在几伏到几百伏之间,其充电和放电电流也很小,为  $10^{-9}$  A 等级,所以在测量时候会受到交流电流感应、电磁干扰等影响,而导致恢复电压出现异常。

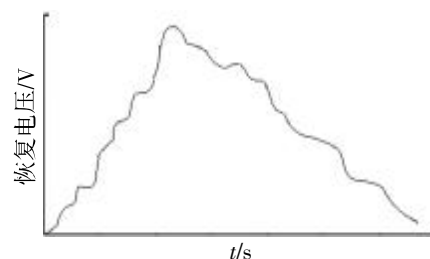


图 6 受到干扰的恢复电压波形

Fig. 6 Disturbed return voltage

某电厂一台电压等级 110 kV、容量 31.5 MV·A

备用变压器,该设备与其他高压运行设备和高压母线距离比较近,测试高压侧前测量其短路电流,发现短路电流起伏不定且幅度不会减小。为排除残余电荷的影响,将试品短路接地24 h后,再次测量短路电流,情况仍然没好转,测得高压侧极化谱见图7(a),从图7(a)中可以看出,由于受到的干扰比较严重,极化谱出现多个局部峰值点,导致无法利用极化谱峰值点对该变压器的绝缘状况进行评判。而该变压器低压侧测试情况正常,极化谱见图7(b)。这也表明了高压绕组匝数比低压绕组多,更容易引入外界干扰。

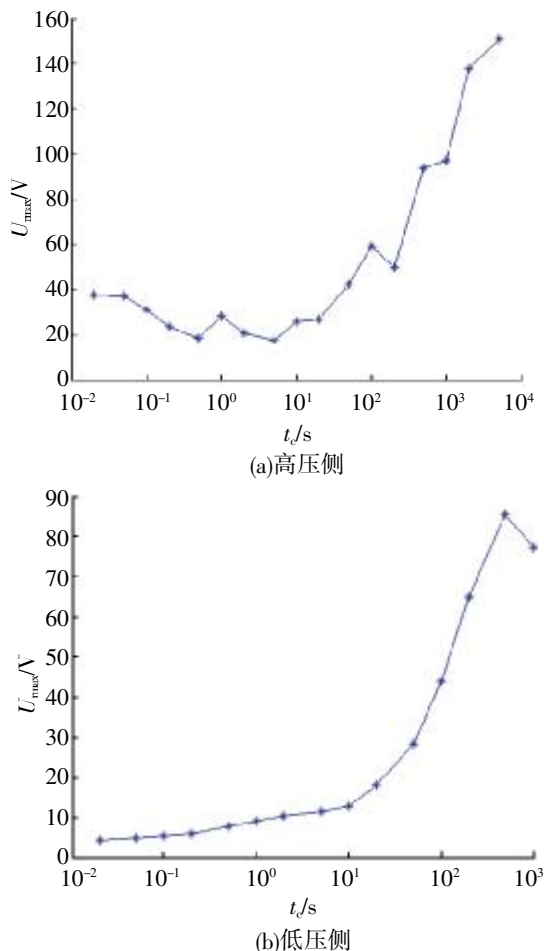


图7 高、低压侧极化谱

Fig. 7 High voltage side & low voltage side polarization spectrum

电磁环境产生的干扰,从介质响应等值电路角度分析,相当于在等值电路模型中并联一个耦合电容,而且耦合电容值是变化的,由于恢复电压最大值与几何电容相关,增加了一个耦合电容,相当于引起电路参数中的几何电容发生变化,从而造成了恢复电压的变动,引起局部峰值。

所以,干扰可能导致作出错误的判断结论,或者难以区别不同的绝缘状况<sup>[19-23]</sup>。试验前应检测现场的干扰情况。要降低现场电磁干扰,RVM测量时采

用的测量引线必须是屏蔽线且尽量不要过长,连线时候,须避免缠绕在一起,这样可减少电场对引线的电容耦合作用。测试前可以通过短路电流来检测干扰情况,如果高压侧干扰严重,不进行高压绕组测量,可对低压侧进行测试,利用低压侧测试结果评估变压器油纸整体绝缘状况,见图7,或将高压侧与低压侧并联后同时对地加压,评估两个绕组并联的绝缘状况,也可综合恢复电压响应的其他特征量来确定可信的峰值时间常数,如恢复电压初始斜率等,进而分析变压器油纸绝缘状况。

此外,现场环境湿度也会影响RVM测试结果。当天气潮湿或下雨、有雾时,空气相对湿度增加,使被试品表面电导增加,表面泄漏电流增大,测量恢复电压时,部分极化电荷仍然可通过局部导电通路释放,从而使恢复电压值陡降,不能真实反映变压器绝缘状态。因此,测量时最好在晴天、相对湿度不大于75%时进行,要求试品外表面干燥清洁。

通过以上分析,可看到现场诸因素的影响是应用恢复电压法评估变压器油纸绝缘状况时需要重视的问题,所以有必要记录RVM测试现场条件的变化。

### 3 结语

文中结合现场试验,提出了RVM方法现场测量的注意事项和防止干扰的措施。通过对RVM测量的现场因素进行了剖析,表明在分析RVM数据时,不能孤立地去看RVM数据,应与试验环境情况有机结合起来分析,注意排除现场因素的影响,以便能测量获取变压器油纸绝缘的真实状态,提高RVM方法对变压器绝缘优劣评估的准确性。

### 参考文献:

- [1] GUBANSKI S M, BOSS P, CSEPES G, et al. Dielectric response methods for diagnostics of power transformers[J]. IEEE Electric Insulation Magazine, 2003, 19(3): 12-18.
- [2] EMSLEY A M, XIAO X, HEYWOOD R J, et al. Degradation of cellulosic insulation in power transformers part 3: Effects of oxygen and water on ageing in oil[J]. IEE Proceedings Science, Measurement and Technology, 2000, 147(3): 115-119.
- [3] SAHAT K, PURKAIT P. Investigating the impacts of ageing and moisture on dielectric response of oil/paper insulation systems [C]//Proceedings of the Thirteenth International Symposium on High Voltage Engineering Delft. Netherlands: [s.n.], 2003: 1-4.
- [4] JOTA P, ISLAM S M, 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.

- [5] GOCKENBACH E. Diagnosis of power transformer insulation[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials.[S.l.]: IEEE,2006: 234-237.
- [6] WARD B H. A survey of new techniques in insulation monitoring of power transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2001,17(3): 16-23.
- [7] 王有元,龚森廉,廖瑞金,等.电力变压器油纸绝缘可靠性与老化特征参量间的相关性[J]. 高电压技术,2011,37(5):1100-1105.  
WANG Youyuan,GONG Senlian,LIAO Ruijin,et al. Relationship between power transformer oil-paper insulation reliability and aging characteristic parameters [J]. High Voltage Engineering,2011,37(5): 1100-1105.
- [8] 许维宗,刘勇,许文蕾,等.电力变压器油纸绝缘状态的诊断——回复电压法[J]. 华中电力,2007,20(4):4-7.  
XU Weizong,LIU Yong,XU Wenlei,et al. Diagnosis of power transformer oil-paper insulation condition-recovery voltage method[J]. Central China Electric Power,2007,20(4): 4-7.
- [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,2011,37(1):136-142.  
LIAO Ruijin,SUN Huigang,YUAN Quan,et al. Analysis of oil-paper insulation aging characteristics using recovery voltage method[J]. High Voltage Engineering,2011,37(1): 136-142.
- [10] SAHA T K,YAO Z T. Experience with return voltage measurements for assessing insulation conditions in service-aged transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(1): 128-135.
- [11] 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.
- [12] 刘刚,廖瑞金,冯运,等.温度对变压器油纸绝缘系统回复电压参数影响规律的研究[J]. 高压电器,2010,46(1):80-84.  
LIU Gang,LIAO Ruijin,FENG Yun,et al. Temperature influence on parameters of return voltage measurement of oil-paper insulation system in transformer[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(1): 80-84.
- [13] 高宗宝,吴广宁,周利军,等.水份含量对变压器油纸绝缘系统回复电压参数影响规律的研究[J]. 高压电器,2011,47(4):37-41.  
GAO Zongbao,WU Guangning,ZHOU Lijun,et al. Influence of moisture content on parameters of return voltage measurement in oil-paper insulation system of transformer [J]. High Voltage Apparatus,2011,47(4): 37-41.
- [14] JAROSŁAW G,MAREK O. Dielectric response of oil-paper insulation systems of large moisture and temperature inhomogeneity[C]//Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering.Beijing,China:[s.n.], 2005:25-29.
- [15] KOZLOVSKIS A,ROZENKRONIS J.Temperature dependence of return voltage characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(3):705-708.
- [16] 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.
- [17] 梁颖辉,欧树华,KACHLER A J.诊断变压器绝缘状态及老化的 PDC 技术的研究[J]. 变压器,2007,44(6):35-39.  
LIANG Yinghui,OU Shuhua,KACHLER A J. Research on PDC technology to diagnose insulation situation and aging in transformer[J]. Transformer,2007,44(6): 35-39.
- [18] 杨启平,薛五德,蓝之达.变压器绝缘老化评估技术的研究[J]. 变压器,2006,43(5):1-5.  
YANG Qiping,XUE Wude,LAN Zhida. Research on aging assessable technique of transformer insulation [J]. Transformer,2006,43(5): 1-5.
- [19] SAHA T K,PURKAIT P. Investigation of an expert system for the condition assessment of transformer insulation based on dielectric response measurement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(3): 1127-1134.
- [20] 任寅寅.直流下油纸绝缘中局部放电脉冲典型波形及其参数提取[J]. 高压电器,2008,44(5):438-441.  
REN Yinyin. Typical pulse shape and feature extraction of PD signals in oil-paper insulation under DC voltage [J]. High Voltage Apparatus,2008,44(5): 438-441.
- [21] 杨双锁,张冠军,董明,等.基于频域介电谱试验的 750 kV 变压器绝缘状况评估[J]. 高压电器,2010,46(4):16-20.  
YANG Shuangshuo,ZHANG Guanjun,DONG Ming,et al. Insulation condition evaluation of 750 kV power transformers based on frequency domain spectroscopy[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(4): 16-20.
- [22] 朱晓伟,梁榕珊.温度对油纸绝缘结构的击穿特性影响的研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,35(1):64-68.  
ZHU Xiaowei,LIANG Rongshan.Study on influence of temperature on breakdown characteristic of oil-paper insulation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2014,35(1):64-68.
- [23] 张银良,赵难来.变压器并联运行中功率因数型控制器异常分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,35(5):96-99.  
ZHANG Yinliang,ZHAO Nanlai. Abnormal analysis of power factor type controller in parallel operation with transformer [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2014,35(5): 96-99.
- 鄢仁武(1981—),男,博士,讲师,从事电气系统检测与处理技术研究。  
(编辑 赵彩莉)