第18卷 第2期 2018年1月
1671—1815(2018)002-0257-07
科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering
Vol. 18 No. 2 Jan. 2018

引用格式:李登云, 胡浩亮, 李 鹤, 等. 不同绝缘支柱材料及改善措施对高压直流分压器测量准确度的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 257—263
Li Dengyun, Hu Haoliang, Li He, et al. Study on the influence of different insulation materials and improvement measures on the measurement accuracy of HVDC voltage divider[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 257—263

不同绝缘支柱材料及改善措施对高压直流分压器测量准确度的影响研究

李登云[1] 胡浩亮[1] 李 鹤[1] 彭 辉[2] 刘 俭[2*] 韩霄汉[3] 胡瑛俊[3]
(中国电力科学研究院[1], 武汉 430074; 武汉大学[2], 武汉 430072;
国网浙江省电力公司电力科学研究院[3], 杭州 310007)

摘 要 在 1×10^{-5} 数量级上提高高压直流电阻分压器的测量准确度,对直流高电压的精密测量具有重要意义。为减小高压直流分压器中沿绝缘支柱表面的泄漏电流,研究了不同绝缘支柱材料及改善措施对分压器测量准确度的影响。搭建包含 50 kV被测分压器、100 kV 标准分压器和同步采集系统的试验平台。在完成高精度数字万用表标定试验后,开展了有机玻璃和聚四氟乙烯材料对分压器测量准确度影响的测量试验。研究了增加内屏蔽电阻和在分压器内部充氮气对分压器测量准确度的改善效果。得出的结论对设计 0.005 级及以上准确度等级的高压直流电阻分压器具有一定的借鉴作用。

关键词 高压直流分压器 准确度 精密测量 绝缘支柱材料 泄漏电流
中图法分类号 TM933,12; **文献标志码** B

直流高电压广泛应用于国民生产和人民生活中,随着社会的发展,对直流高电压的测量准确度要求越来越高[1—4]。直流电阻分压器的测量准确度直接决定了直流高电压的测量准确度[5]。

为减小电阻发热引起的分压器内部温度升高,直流电阻分压器的工作电流常设计的很小,一般为 0.25 ~ 1 mA。随着分压器电压等级的升高,绝缘支柱表面的泄漏电流逐渐增大,泄漏电流对工作电流的分流作用逐渐明显,从而降低分压器的测量准确度[6—8]。本文主要通过试验测量的方法,研究有机玻璃和聚四氟乙烯两种材料做绝缘支柱时,泄漏电流对分压器测量准确度的影响,以及采取增加内屏蔽电阻和在分压器内部充氮气两种措施时,分压器测量准确度的改善情况。

1 泄漏电流引入测量误差原理

图 1 为直流电阻分压器的基本原理图。其中,U 为分压器的高压侧电压;u 为分压器的二次侧输出电压;R_1、I_1 分别为直流电阻分压器的高压臂电阻和流过高压臂的等效电流;R_2、I_2,分别为直流电阻分压器的低压臂电阻和流过低压臂的等效电流。

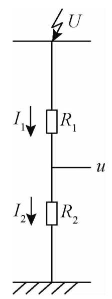


图 1 直流电阻分压器工作原理图
Fig. 1 Schematic diagram of DC resistance divider

在理想条件下,有 $I_1 = I_2$。因此分压器的分压比 K 可通过式(1)计算[9],其与高低压臂的电阻比相同,即

$$K = \frac{U}{u} = \frac{I_1R_1 + I_2R_2}{I_2R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \tag{1}$$

在实际工程应用中,分压电阻间高电位常发生微弱放电,产生沿绝缘支柱表面的泄漏电流。泄漏电流流通路径如图 2 所示。

在施加高电压 U 时,沿绝缘支柱表面发生泄漏。泄漏电流的分流作用使得 $I_1 \neq I_2$,令 $I_1/I_2 = [1 + \Delta k(U)]$,则式(1)可以写为

$$K(U) = \frac{[1 + \Delta k(U)]R_1 + R_2}{R_2} \tag{2}$$

在实际工程应用中,沿绝缘支柱表面泄漏电流的产生具有较大随机性和分散性。因此有必要建立

2017 年 5 月 26 日收到 国家电网公司科技项目(JL71-15-042)资助
第一作者简介:李登云(1981—),男,硕士。研究方向:高电压大电流计量测试技术。E-mail:1957375411@qq.com。
* 通信作者简介:刘 俭。E-mail:2411756356@qq.com。

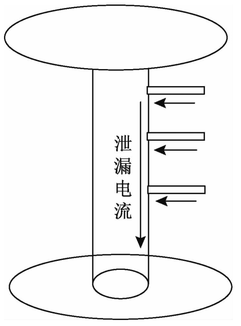


图2 泄漏电流流通路径

Fig. 2 The path of leakage current

试验平台,开展不同绝缘支柱材料和改善措施对分压器测量准确度影响的测量试验,以优化分压器的结构设计。

2 试验平台建立

本文建立的试验平台包含一台直流高压电源,两台高精度数字万用表 A 和 B,一台溯源到国家标准的 100 kV 标准分压器,一台试验用 50 kV 直流电阻分压器以及同步采集模块。100 kV 标准分压器具有较高的准确度和稳定性,其在 0 ~ 50 kV 的线性度优于 1×10^{-5},则可以认为 100 kV 标准分压器在 0 ~ 50 kV 的分压比不变。试验平台各参数性能参数如下:

2.1 直流高压电源

直流高压电源采用高稳定度直流高压电源,如图3(a)所示。其最高输出电压为 120 kV,最大输出电流为 2.5 mA,在电压、电流调节预热 0.5 h 后,输出电压的稳定度可以达到 1×10^{-4}/h。

2.2 高精度数字万用表

选用高精度数字万用表 Agilent3458A 对分压器的二次信号进行测量。Agilent3458A 高精度数字万用表如图3(b)所示。其具有极快的数字吞吐量和卓越的线性度,极低的内部噪声以及优异的短期稳定度。其在直流电压档量程为 1 V 和 10 V 时的性能参数如表1所示。

表1 Agilent3458A 1 V 和 10 V 时的性能参数

Table 1 Performance parameters of Agilent3458A

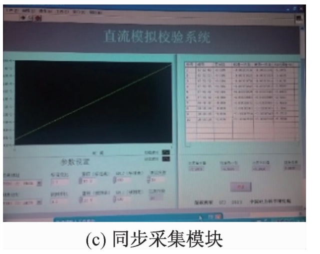
量程/V	最高分辨率/nV	输入阻抗/GΩ	温度系数 [10^{-6}读数 + 10^{-6}量程]	24 h 精度 [10^{-6}读数 + 10^{-6}量程]
1	10	>10	1.2 + 0.1	1.5 + 0.3
10	100	>10	0.5 + 0.01	0.5 + 0.05

2.3 同步采集模块

利用 Labview 软件设计同步采集模块,对数字万用表进行控制,使其能够同时进行数据采集,并将采集到的数据发送到计算机进行存储、计算,以此减小因电源电压变化、电源微小波动等因素引起的测量误差。Labview 同步采集模块界面如图3(c)所示。

(a) 直流高压电源

(b) 高精度数字万用表



(c) 同步采集模块

图3 试验平台

Fig. 3 Test platform

2.4 100 kV 标准分压器

采用国家高电压计量站已建立的 100 kV 标准分压器作为被测分压器的参考。100 kV 标准分压器的参数如表2所示。

表2 100 kV 标准分压器性能参数

Table 2 Performance parameters of 100 kV standard voltage divider

指标名称	参数
额定分压比	100 kV/10 V,100 kV/1 V
高压臂电阻/mΩ	400
低压臂电阻/kΩ	40/4
额定电流/mA	0.25
线性度	1×10^{-5}

试验开始前,应检查集成有同步采集模块的工控机,高精度数字万用表,直流高压电源,标准分压器以及被测分压器的接地端是否可靠接地[10—13]。试验装置按图4所示进行连接。标准分压器与被测分压器应保持一定距离,防止其互相产生干扰,高压极板以及均压环应与高压输入端可靠连接。Agilent3458A 在测量过程中应选择合适量程,并通过数

据总线与工控机连接。工控机的测量通道应与分压器二次侧输出信号一一对应,并通过同步采集软件对数字万用表进行控制,以达到对数据的同步采集、存储和计算的目的。图 5 为 100 kV 标准分压器与 50 kV 被测分压器接线实物图。

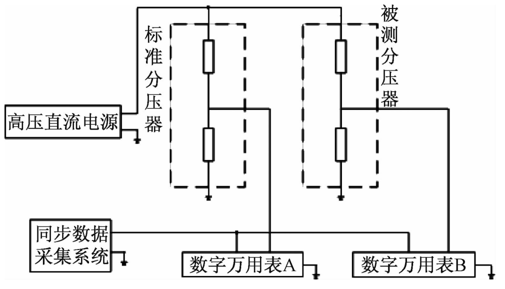


图 4　试验接线原理图

Fig. 4　Schematic diagram of test connection

图 5　100 kV 标准分压器与 50 kV 被测分压器接线实物图

Fig. 5　100 kV standard voltage divider and 50 kV measured voltage divider wiring diagram

3　试验结果及分析

3.1　数字万用表标定试验

在进行不同绝缘材料对直流电阻分压器测量精度影响试验之前,应先对高精度数字万用表进行标定试验,测定不同数字万用表的测量一致性,防止其对后续试验测量结果引入系统误差。

将电压从 5 kV 升至 50 kV,在 5 ~ 50 kV 范围内,每 5 kV 为一个电压测量点。每个测量电压点的测量次数为 10 次,用工控机记录两台数字多用表的读数,并计算出两台数字多用表 10 次读数的相对误差的平均值和平均值的实验标准偏差。数字万用表在不同电压等级下的标定结果如表 3 所示。

高精度数字万用表的标定试验结果显示,当两台数字多用表的量程为 10 V 档,测量电压在 0.5 V、1 V、…、4.5 V、5 V 附近时,同步测量系统 10 次测量的相对误差线性度处于 10^{-6} 数量级,且其测量实验标准偏差在 2×10^{-7} 数量级,对测量结果分散性的影响很小,可以忽略不计。

3.2　绝缘材料对测量精度影响试验

在进行绝缘材料对测量精度影响试验之前,将直流高压电源打开并预热半小时后,调节增压按钮

表 3　高精度数字万用表标定结果

Table 3　Calibration results of high precision digital multimeter

电压等级/kV	相对误差平均值/10^{-6}	平均值的实验标准偏差/10^{-6}
5	6.2	0.29
10	7.3	0.21
15	7.2	0.13
20	7.2	0.13
25	7.2	0.13
30	7.2	0.13
35	7.4	0.16
40	7.4	0.16
45	7.3	0.15
50	7.6	0.22

将直流高压电源输出电压升至 5 kV。打开工控机,并对两块数字万用表进行同步数据采集控制,采集 30 组标准分压器和被测分压器输出信号,并实时计算标准分压器和被测分压器输出信号之间的相对误差。依次调节增压按钮使输出电压分别为 10 kV、15 kV、20 kV、25 kV、30 kV、35 kV、40 kV、45 kV、50 kV,并记录不同电压等级下标准分压器和被测分压器输出信号之间的相对误差。

在进行三次试验后,撤下 50 kV 被测分压器,将其内部有机玻璃支柱换为聚四氟乙烯材料支柱。进行试验并记录不同电压等级下标准分压器和被测分压器输出信号之间的相对误差。

将不同绝缘支柱材料的试验结果进行整理和分析。图 6 和图 7 所示为绝缘支柱材料为有机玻璃时测量相对误差的平均值及平均值实验标准偏差。

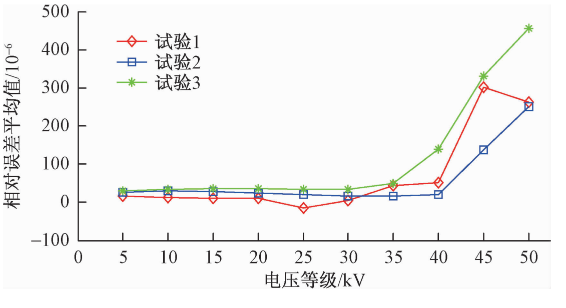


图 6　绝缘支柱材料为有机玻璃时测量相对误差平均值

Fig. 6　The average relative error of the measurement of the insulation support material for organic glass

由图 6 和图 7 可知,绝缘支柱材料为有机玻璃时,被试分压器 5 ~ 50 kV 的相对误差变化量达在 10^{-4} 数量级。5 ~ 40 kV 的相对误差保持在 1×10^{-5} 数量级,实验标准偏差稳定在 2×10^{-6} 数量级;当电压高于 40 kV 时,被试分压器的相对误差最高上升

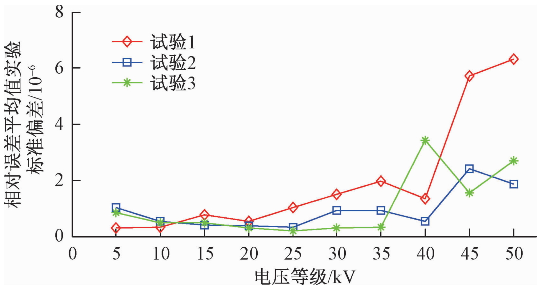


图 7 绝缘支柱材料为有机玻璃时测量相对误差平均值实验标准偏差

Fig. 7 Experimental standard deviation of the measure-ement of the insulating support material for organic glass

到 5×10^{-4} 数量级，实验标准误差也相应增大，最高达到 6×10^{-6} 数量级。说明 5～40 kV 时，有机玻璃支柱表面的泄漏电流不大，因此相对误差变化小，量值稳定；当电压增大到 40 kV 时，有机玻璃支柱表面泄漏电流显著增大，导致相对误差急剧变化，稳定性变差。

图 8 和图 9 所示为绝缘支柱材料为聚四氟乙烯时测量相对误差的平均值及平均值实验标准偏差。

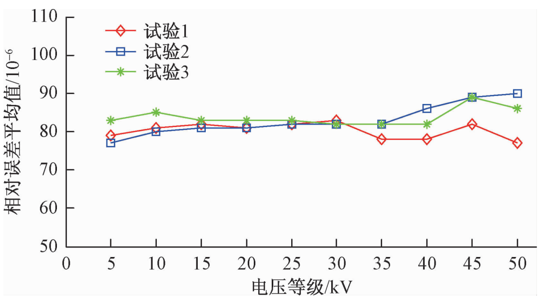


图 8 绝缘支柱材料为聚四氟乙烯测量相对误差平均值

Fig. 8 The average relative error of the measurement of the insulation support material for PMMA

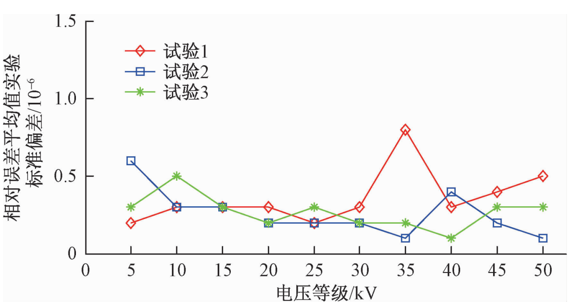


图 9 绝缘支柱材料为聚四氟乙烯时测量相对误差平均值实验标准偏差

Fig. 9 Experimental standard deviation of the measurement of the insulating support material for PMMA

综合图 8 和图 9 可以看出，绝缘支柱材料为聚四氟乙烯时，被试分压器 5～50 kV 的相对误差变化量达到 1.5×10^{-5} 数量级，实验标准偏差稳定在 1×10^{-6} 数量级以内。相比于有机玻璃，采用聚四氟乙烯做绝缘支柱的被试分压器分压比线性度小，测量量值稳定且分散性小。

3.3 内屏蔽电阻对测量精度影响试验

在 50 kV 被测分压器的分压电阻层内增加屏蔽电阻层，对内屏蔽电阻对分压器测量准确度影响进行试验。试验结果如下：

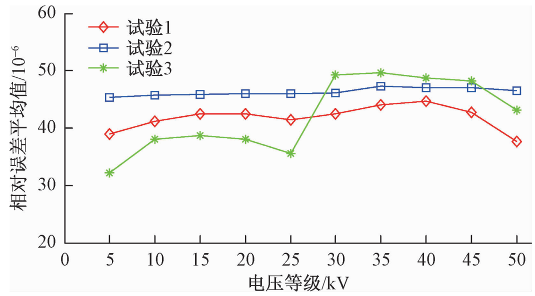


图 10 绝缘支柱材料为有机玻璃测量相对误差平均值

Fig. 10 The average relative error of the measurement of the insulation support material for organic glass

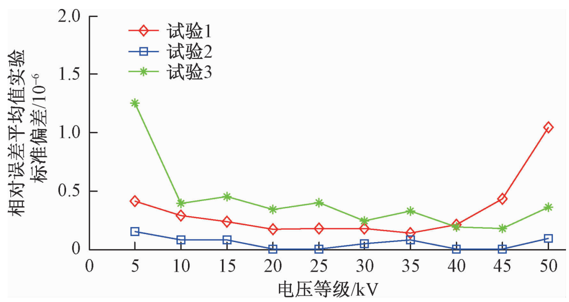


图 11 绝缘支柱材料为有机玻璃时测量相对误差平均值实验标准偏差

Fig. 11 Experimental standard deviation of the measurement of the insulating support material for organic glass

由图 10 和图 11 可知，与未安装内屏蔽电阻相比，安装有内屏蔽电阻层且采用有机玻璃为绝缘支柱的被试分压器，相对误差的变化量从 5×10^{-4} 降低到 2×10^{-5}，实验标准偏差从 6×10^{-6} 降低到 5×10^{-7}。对采用有机玻璃作为绝缘支柱的分压器而言，安装内屏蔽电阻能够减小测量误差线性度，提高稳定性，对分压器测量准确度的提高具有良好的改善效果。

安装屏蔽电阻后绝缘支柱材料为聚四氟乙烯的被测分压器试验结果如图 12 和图 13 所示。

安装内屏蔽电阻后，绝缘支柱为聚四氟乙烯材料的被试分压器相对误差在 1×10^{-5} 以内，实验标准偏差稳定在 4×10^{-7} 数量级。由于测量系统的不确定度为 1×10^{-5} 量级，因此安装屏蔽电阻对绝缘支柱为聚四氟乙烯材料的被试分压器线性度的改善效果无法准确测量。

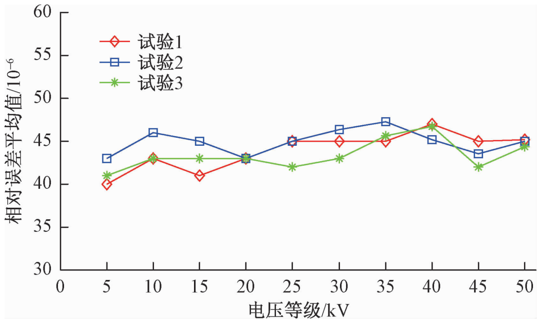


图 12　绝缘支柱材料为聚四氟乙烯测量误差平均值

Fig. 12　The average relative error of the measurement of the insulation support material for PMMA

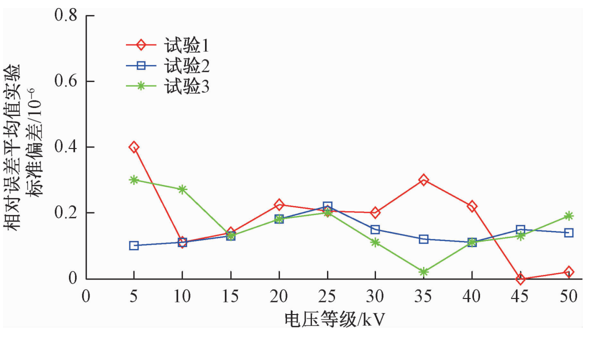


图 13　绝缘支柱材料为聚四氟乙烯时测量相对误差平均值实验标准偏差

Fig. 13　Experimental standard deviation of the measurement of the insulating support material for PMMA

3.4　氮气对测量精度影响试验

检查被测分压器上下铝板与绝缘外筒之间的螺栓是否松动,并检查气阀与气压表周围的气密性。采用气体置换法将分压器内部的空气排出。将氮气瓶中的氮气通过充气嘴缓慢充入分压器,当气压表的读数达到0.4 MPa 时停止。将分压器中的气体缓慢放出,并再次充入氮气。依次重复三次操作。经计算此时分压器内部氮气的体积分数达到99.61%。重新进行绝缘材料对分压器精度影响试验。

充入氮气后,绝缘支柱材料为有机玻璃的被测分压器试验结果如图 14 和图 15 所示。

图 14 和图 15 的试验结果显示,充入氮气后,绝缘支柱为有机玻璃材料的分压器测量相对误差变化量从 5×10^{-4}降低到 2.5×10^{-5}量级,实验标准偏差下降到 2×10^{-6}数量级。氮气的充入可以减小被试分压器测量相对误差变化,提高量值稳定性。

在充入氮气后,绝缘支柱材料为聚四氟乙烯的被测分压器试验结果如图 16 和图 17 所示。

从试验结果来看,采用聚四氟乙烯为绝缘支柱材料的被试分压器相对误差线性度依然在 1.5×10^{-5}数量级,实验标准偏差为 5×10^{-7}数量级。实

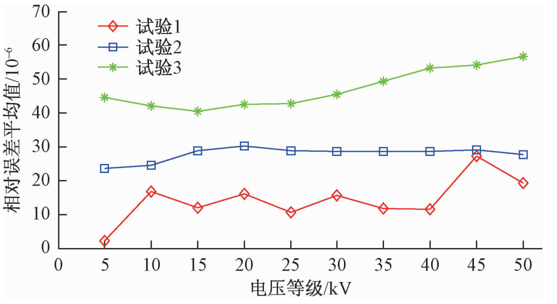


图 14　绝缘支柱材料为有机玻璃测量相对误差平均值

Fig. 14　The average relative error of the measurement of the insulation support material for organic glass

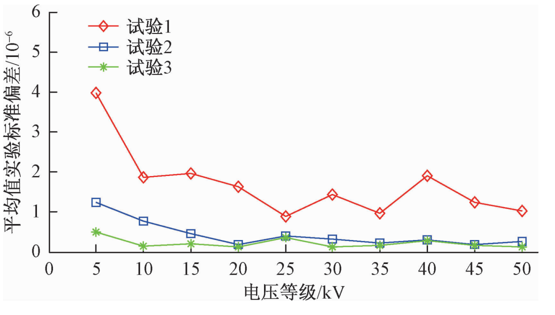


图 15　绝缘支柱材料为有机玻璃时测量相对误差平均值实验标准偏差

Fig. 15　Experimental standard deviation of the measurement of the insulating support material for organic glass

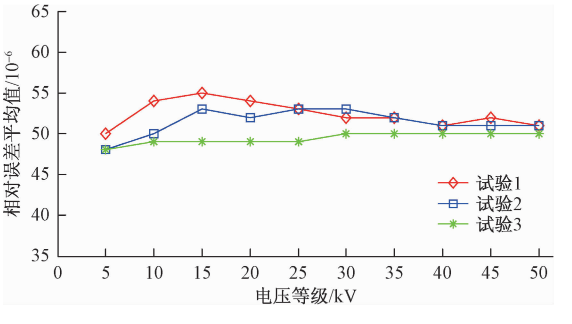


图 16　绝缘支柱材料为聚四氟乙烯时测量误差平均值

Fig. 16　The average relative error of the measurement of the insulation support material for PMMA

际上,绝缘支柱为聚四氟乙烯材料的被试分压器线性度和测量系统的不确定度均处于 10^{-5}量级,因此无法准确测量测量出在以聚四氟乙烯为绝缘支柱材料的分压器内充氮气对分压器测量准确度的改善效果。

4　结论

本文通过通过建立试验平台,对不同绝缘支柱材料对分压器测量精度的影响以及填充氮气和增加内屏蔽电阻对泄漏电流的改善效果进行了试验。试验结果表明。

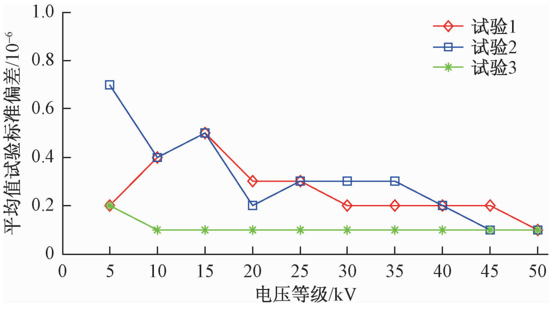


图 17 绝缘支柱材料为聚四氟乙烯时测量相对误差平均值实验标准偏差

Fig. 17 Experimental standard deviation of the measurement of the insulating support material for PMMA

(1)通过对高精度数字万用表进行标定试验，高精度数字万用表对试验引入的测量误差在 8ppm 以内，测量误差变化在 10^{-6} 数量级，且其对测量结果分散性的影响在 10^{-6} 以内，可以忽略不计。

(2)分压器绝缘支柱为有机玻璃材料时，线性度在 5×10^{-4} 数量级，且电压较高时的测量稳定性差，而绝缘支柱为聚四氟乙烯材料时，线性度能够达到 1.5×10^{-5} 水平。

(3)内屏蔽电阻对绝缘支柱为有机玻璃材料的分压器测量准确度具有良好的改善效果。线性度从 5×10^{-4} 改善到了 1.5×10^{-5}，分散性从 6×10^{-6} 降低到 5×10^{-7}。

(4)填充氮气使得绝缘支柱为有机玻璃材料的被试分压器相对误差变化量从 5×10^{-4} 降低到 2.5×10^{-5} 量级，实验标准偏差下降到 2×10^{-6} 数量级。氮气的充入使被试分压器的线性度减小，稳定性提高。

(5)由于聚四氟乙烯的线性度在 10^{-5} 数量级，内屏蔽和氮气对聚四氟乙烯的改善作用应在 10^{-5} 数量级以内，而测量系统的不确定度也在 10^{-5} 数量级，因此无法准确测量。

本文得出的结论对研制高精度直流分压器时绝缘支柱材料和减小泄漏电流措施的选取具有较大意义。

参 考 文 献

1 刘振亚. 特高压直流输电理论. 北京:中国电力出版社, 2009
Liu Zhenya. UHVDC transmission theory. Beijing: China Electric Power Press, 2009

2 袁青云. 我国特高压直流输电发展规划与研究成果. 电力设备, 2007; 8(3): 1—4
Yuan Qingyun. Development plan and research achievement of UHVDC transmission in China. Power Equipment, 2007; 8(3): 1—4

3 苏宏田, 齐 旭, 吴 云. 我国特高压直流输电市场需求研究. 电网技术, 2005; 29(24): 1—4
Su Hongtian, Qi Xu, Wu Yun. Study on market demand of UHVDC transmission in China. Power System Technology, 2005; 29(24): 1—4

4 赵中原, 方 志, 邱毓昌, 等. 高压直流换流站技术现状和发展. 中国电力, 2002; 35(3): 48—51
Zhao Zhongyuan, Fang Zhi, Qiu Yuchang, *et al*. Records of HVDC converter station technology status and development. China Power, 2002; 35(3): 48—51

5 李宪优, 于丽娟, 阮林波, 等. 精密直流分压技术及其应用. 核电子学与探测技术, 2012; 32(8): 918—924
Li Xianyou, Yu Lijuan, Ruan Linbo, *et al*. Precision DC voltage dividing technology and its application. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2012; 32(8): 918—924

6 赵有斌, 于永明, 周敏刚, 等. 嵊泗 ±500 kV 直流输电工程用电压传感器的研制. 高压电器, 2002; 38(2): 12—14
Zhao Youbin, Yu Yongming, Zhou Mingang, *et al*. Development of voltage sensor for 50 kV DC transmission project in Shengsi. High Voltage Apparatus, 2002; 38(2): 12—14

7 李 前. 高压直流电压计量标准和现场量值传递方法的研究. 武汉: 华中科技大学, 2012
Li Qian. Research on high voltage DC voltage measurement standard and field value transfer method. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012

8 Patarakijkul D, Kurupakorn C, Charoensook A. Construction and Evaluation off 100 kV DC high voltage divider. Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 2010; 13—18

9 Man Y H, Mi J J. A numerical study on three-dimensional conjugate heat transfer of natural convection and conduction in a differentially heated cubic enclosure with a heat-generating cubic conducting body. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000; 43(23): 4229—4248

10 胡 岸, 王振达. 50 kV 小型高压直流电阻分压器的研制. 机电信息, 2016; (12): 132—133
Hu An, Wang Zhenda. Development of 50 kV high voltage DC resistance divider. Electromechanical Information, 2016; (12): 132—133

11 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术. 北京: 清华大学出版社, 2002
Zhang Renyu, Chen Changyu, Wang Changchang. High voltage test technology. Beijing: Tsinghua University Press, 2002

12 章述汉, 周一飞, 李登云, 等. 800 kV 换流站直流电压互感器现场校准试验. 高电压技术, 2011; 37(9): 2119—2125
Zhang Shuhan, Zhou Yifei, Li Dengyun, *et al*. DC voltage transformer field calibration test of 800 kV converter station. High Voltage Technology, 2011; 37(9): 2119—2125

13 李 前, 章述汉, 李登云, 等. 500 kV 直流电压互感器现场校准技术试验分析. 高电压技术, 2010; 36(11): 2856—2862
Li Qian, Zhang Shuhan, Li Dengyun, *et al*. Test and analysis of field calibration technique for 500 kV DC voltage transformer. High Voltage Technology, 2011; 37(9): 2119—2125

Study on the Influence of Different Insulation Materials and Improvement Measures on the Measurement Accuracy of HVDC Voltage Divider

LI Deng-yun[1], HU Hao-liang[1], LI He[1], PENG Hui[2], LIU Jian[2*], HAN Xiao-han[3], HU Ying-jun[3]

(China Electric Power Research Institute[1], Wuhan 430074, China; Wuhan University[2], Wuhan 430072, China; State Grid Zhejiang Electric Power Company Electric Power Research Institute[3], Hangzhou 310007, China)

[**Abstract**] It is important to improve the measurement accuracy of the high voltage DC resistance divider at 1×10^{-5} order of magnitude. In order to reduce the leakage current along the insulating pillar surface in the high voltage DC divider, this paper studies the influence of different insulation materials and the improvement measures on the accuracy of the voltage divider. The test platform is built, which includes the 50 kV divider, 100 kV standard voltage divider and synchronous acquisition system. After completing the calibration test of the high precision digital multimeter, the measurement experiment of the influence of the organic glass and the polytetrafluoroethylene material on the measuring accuracy is carried out. And the effect of increasing the internal shielding resistance and filling the nitrogen in the divider on the accuracy of measuring is studied. The conclusions obtained in this paper can be used as a reference for the design of high voltage DC resistance divider with 0.005 accuracy levels.

[**Key words**] high voltage DC divider　accuracy　precision measurement　insulating pillar material　leakage current