

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.06.005

T型网络对介损试验影响的仿真分析与建议

李永昆, 赵胜男, 常莉敏, 王笑宇, 杨明, 徐静

(国网河南省电力公司超高压公司, 郑州 450000)

摘要: 文中介绍一起 500 kV 断路器并联电容器现场交接试验负介损值的案例, 经现场检查、原理分析, 发现并联电容器下方木质支撑架构受潮, 形成 T 型网络, 造成被试品介损实测值为负值。为探究此 T 型网络各参数对被试品电容量和介损的影响规律, 对 T 型网络进行等值电路分析, 利用 Matlab 进行仿真分析, 发现被试品电容量和介损的测量误差随着对地杂散电阻的增大而增大, 随杂散电容的增大, 介损值的影响误差先增大后减小, 电容量的误差一直增大, 杂散电阻的影响与杂散电容相反。针对现场试验环境, 提出相应具体措施, 为相关设备的现场试验提供经验借鉴。

关键词: 负介损值; 支撑架构; T 型网络; 仿真分析; 误差

Simulation Analysis and Suggestions on Influence of T-type Network on Dielectric Loss Testing

LI Yongkun, ZHAO Shengnan, CHANG Limin, WANG Xiaoyu, YANG Ming, XU Jing

(State Grid Henan Extra High Voltage Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In this paper, a case of negative dielectric loss during on-site hand-over test of a parallel capacitor for 500 kV circuit breaker is introduced. It is found through on-site inspection and principle analysis that the wood support structure beneath the parallel capacitor is damped and T-type network is formed, causing the measured dielectric loss to be negative. In order to explore the influence of each parameter of this T-type network on the capacitance and dielectric loss of the tested object, an equivalent circuit analysis is performed on the T-type network. Matlab is used for simulation analysis. It is found that the measurement error of the capacitance and dielectric loss of the tested object is increased with the increase of stray resistance to ground. With the increase of stray capacitance, the error of dielectric loss is increased firstly and then decreased. The error of capacitance is continued to increase, and the influence of stray resistance is opposite to that of stray capacitance. As for the test environment at site, the corresponding specific measures are proposed so to provide experience reference for the on-site testing of the relevant equipment.

Keywords: negative dielectric loss; supporting structure; T-type network; simulation analysis; error

0 引言

介质损耗因数是判断容性设备绝缘水平的一种有效手段, 通过测量介损可以有效反映设备是否存在油质劣化、整体受潮及严重的局部缺陷^[1-2], 但是在现场试验时, 由于电场干扰、瓷套表面潮湿或脏污、空间构架(杂物、墙壁、梯子等)等干扰对介损值影响较大^[3-7], 甚至会造成负介损值, 影响对设备状态的正确判断^[8-14]。

1 介损试验数据

在某变电站安装断路器并联电容器时对其进行

电容量和介损值测量试验, 并联电容器型号为 JWM192-0.002 5GH, 出厂实测电容和介损值为 2 503 pF 和 0.05%, 现场试验时, 将 6 支并联电容器一次摆放在木质架构上面; 现场测试见图 1。测试时温度为 35℃, 湿度为 43%。

试验结果电容量为 2 506 pF, 介损值为 -0.19%, 电容量初值差符合标准(Q/GDW 11447—2015 10 kV~500 kV 输变电设备交接试验规程: 电容值偏差不超过额定值的 $\pm 5\%$)^[13-14], 介损值为负值, 初步判定现场有干扰; 经多次复测, 并对其他 5 支进行测试, 介损值均为负值, 更换试验仪器后, 介损值基本无变化。

收稿日期: 2024-02-18



图1 现场测试
Fig. 1 Test site

2 理论分析

一般认为,被试品介损值为负值的原因有:电桥标准电容器 C_N 受潮、电场干扰、瓷套表面潮湿或脏污严重、空间构架(杂物、墙壁、梯子等)构成空间干扰网络^[15-26],就以上4点干扰因素本试验一一进行了分析验证。

2.1 电桥标准电容器 C_N 受潮情况

现场采用了两台介质损测试仪进行交叉验证,介损值几乎无变化,可以排除由仪器电桥标准电容器 C_N 受潮所引起的负介损值情形,判断与标准电容器受潮无关。

2.2 电磁场干扰情况

由于试验时周围间隔都处于检修状态,电磁场干扰较小。同时数字电桥介损仪本身采用的变频法也具有一定的排除电磁场干扰的作用,因此排除介损值为负值与电磁场干扰有关。

2.3 瓷套表面潮湿或脏污严重

经现场检查,并联电容器套管表面无脏污,且表面干燥,为彻底排除瓷套表面潮湿或脏污影响,现场对瓷套瓷套表面进行进一步清擦和干燥处理后进行复测,测试结果无变化,排除瓷套表面潮湿或脏污影响。

2.4 空间构架(杂物、墙壁、梯子等)构成空间干扰网络

被试品周围有杂物,特别是木质物品,易造成测量误差及测量值异常,本试验下方放置木质架构,木质架构为并联电容器包装箱拆卸所得,经查询确认该包装箱已露天放置半年,且拆箱时发现包裹并联电容器所用塑料薄膜袋中积有雨水,有洒漏木质架构情形。因此本文认为并联电容器容量介损值为负与被试品下方支撑所用木质架构有关。

T型网络等效模型和等值电路见图2。试验支撑木质架构受潮后形成T型网络,被试品上端对木质架构有分布电容 C_1 ,下端对木质架构有分布电容 C_2 ,同时会出现一个等效接地电阻 R 。

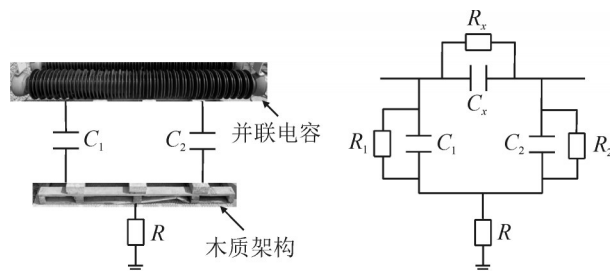


图2 T型网络等效模型和等值电路
Fig. 2 Equivalent model and equivalent circuit of T-type network

T型网络3个端点A、B和C分别为高压端、测试端和接地端,将A、B和C组成的星形接线转换为角形接线,见图3。其中, Z_{AC} 与数字电桥并联^[23-25],对被试品参数无影响, Z_{BC} 与数字电桥 R_3 并联,由于 R_3 电阻值很小,远远小于 Z_{BC} 阻抗值,可以忽略,故对被试品电容值和介损值产生影响的主要是 Z_{AB} ,则被试品实测的电容量和介损值为被试品和 Z_{AB} 并联后的电容量和介损值。由星角变换可计算 Z_{AB} 为

$$Z_{AB} = \frac{R_1(1 + j\omega R_2 C_2) + R_2(1 + j\omega R_1 C_1) + R_1 R_2 / R}{(1 + j\omega R_2 C_2)(1 + j\omega R_1 C_1)} \quad (1)$$

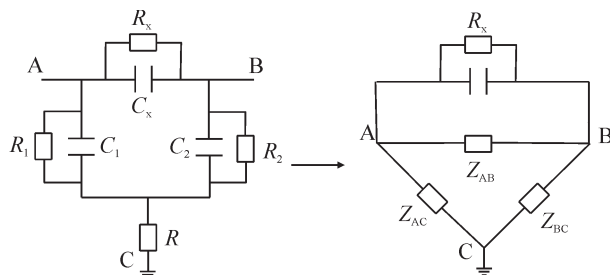


图3 T型网络星形接线转角形接线
Fig. 3 T-type network star connection transformed to delta connection

3 仿真分析

为探究各参数变化对并联电容器电容量和介损测量值的影响规律,通过改变上图中各个参数值,利用 Matlab 进行多次仿真计算,得出各个参数的变化对电容量和介损值的影响。其中被试品电容量和介损值分别取 2 503 pF 和 0.005%。

由式(1)可知,被试品上端对木质架构的杂散电容和杂散电阻 C_2 、 R_2 对被试品电容量和介损的影响规律与 C_1 、 R_1 一致。故下文仅分析 R 、 C_1 、 R_1 的变化对被试品的影响规律。

3.1 杂散电阻 R 对并联电容器电容量和介损测量值的影响

改变木质架构对地杂散电阻 R ,由计算结果绘制并联电容器电容量和介损实测值随 R 的变化曲线,见图 4-5 所示。

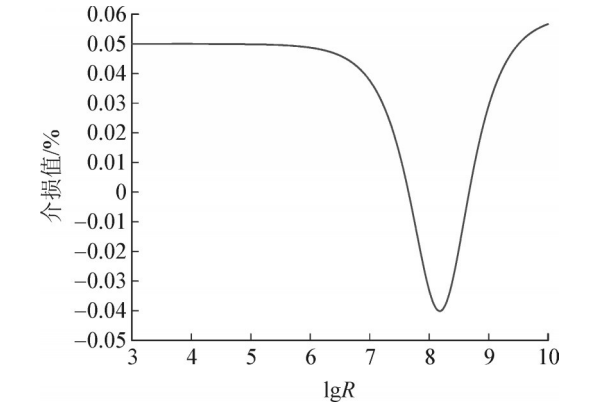


图4 实测介损值随 R 的变化曲线
Fig. 4 Variation curve of measured dielectric loss with R

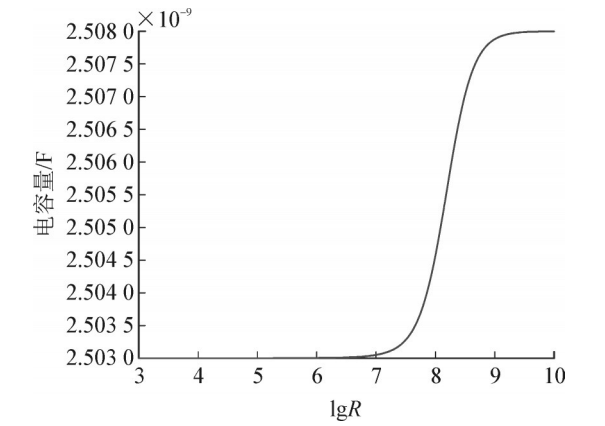


图5 实测电容量随 R 的变化曲线
Fig. 5 Variation curve of measured capacitance with R

由图 5 可知,随着 R 的增大,实测介损值由被试品初始介损值减小至负值后增大为正值,并最终介于被试品初始值介损值和杂散电容介损值。由图 5 可知,随着 R 的增大,实测电容量由被试品初始电容量一直增大,最大值接近被试品和杂散电容 C_1 、 C_2 串联后的并联值。由此可见,在现场测试时,为消除杂散电阻 R 对并联电容器电容量和介损测量值的影响,可将木质架构直接接地,使杂散电阻 R 接近于零。

3.2 杂散电容 C_1 对并联电容器电容量和介损测量值的影响

改变被试品上端对木质架构的杂散电容 C_1 的值,由计算结果绘制并联电容器电容量和介损测量值随 C_1 的变化曲线,见图 6-7。

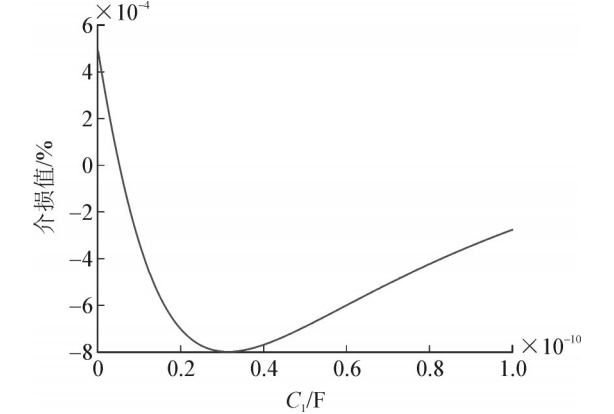


图6 实测介损值随 C_1 的变化曲线
Fig. 6 Variation curve of measured dielectric loss with C_1

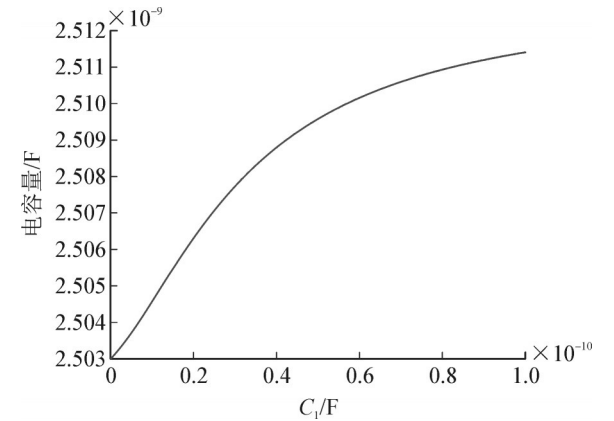


图7 实测电容量随 C_1 的变化曲线
Fig. 7 Variation curve of measured capacitance with C_1

由图 6 可知,随着杂散电容 C_1 的增大,实测介损值由被试品初始介损值先减小至负值后增大为正值。由图 7 可知,随着 C_1 的增大,测试电容量由被试品初始电容值一直增大,最大值接近被试品和杂散电容 C_1 、 C_2 串联后的并联值。由此可见,在现场测试时,为减小杂散电容 C_1 对并联电容器电容量和介损测量值的影响,应减小被试品上端对木质架构的杂散电容,即使被试品远离周边木质架构。

3.3 杂散电阻 R_1 对并联电容器电容量和介损测量值的影响

改变被试品下端对木质架构的杂散电阻 R_1 的值,此处由计算结果绘制并联电容器电容量和介损测量值随 R_1 的变化曲线,见图 8-9。

由图 8 可知,随着杂散电阻 R_1 的增大,实测介损值由 0.000 7 先缓慢增大至 0.000 802 5 后减小至负值。分析如下,当杂散电阻 R_1 较小时,其对被试品介损的影响可近似忽略,此时相当于杂散电容 C_2 和杂散电阻 R_2 与被试品并联,即此时介损值为被试

品和杂散电容并联后的介损值;对于介损值出现极大值,由式(1)可知,其实部和虚部均为关于 R_1 的二元一次函数, Z_{AB} 与被试品并联后计算介损值时,介损值为两者并联后实部与虚部的比值的相反数,仍为关于杂散电阻 R_1 的二元一次函数,故当杂散电阻 R_1 逐渐增大时,可能会导致介损值出现极大值情况,当调整其他参数后,例如调整 R_2 阻值,介损值可能为单调递减曲线,见图9。

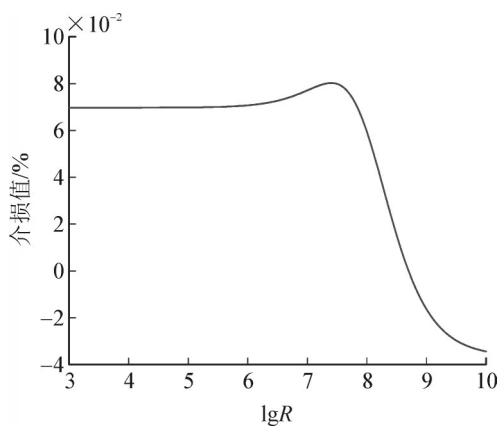


图8 实测介损值随 R_1 的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of measured dielectric loss with R_1

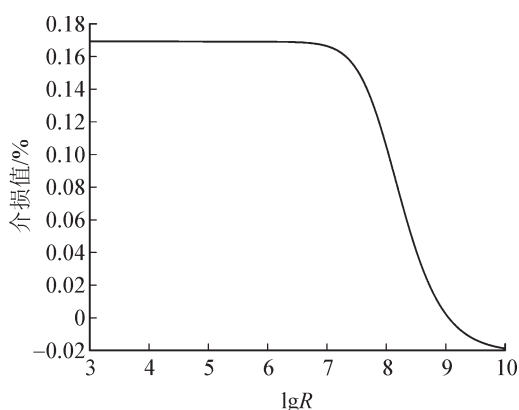


图9 R_2 为 $1\text{ G}\Omega$ 时实测介损值随 R_1 的变化曲线

Fig. 9 Variation curve of measured dielectric loss with R_1 when R_2 is $1\text{ G}\Omega$

实测电容量随 R_1 的变化曲线见图10。随着杂散电阻 R_1 的增大,实测电容量由 $2\,513\text{ pF}$ 一直降低至 $2\,504\text{ pF}$;分析如下,当杂散电阻 R_1 较小时,其对被试品介损的影响可近似忽略,此时相当于杂散电容 C_2 和杂散电阻 R_2 影响被试品,即此时电容量为被试品和杂散电容并联后的电容量;当杂散电阻 R_1 较大时,实测电容量为 Z_{AB} 与被试品电容量并联的总电容量。由此可见,当杂散电阻 R_1 较小时,其对被试品介损值相对影响较小,但对电容量影响最大;随着杂散电阻 R_1 增大,对介损影响越来越大,但是对电容量影响越来越小。

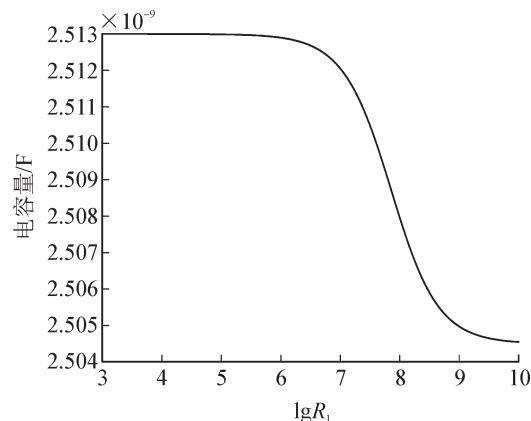


图10 实测电容量随 R_1 的变化曲线

Fig. 10 Variation curve of measured capacitance with R_1

4 结论与建议

4.1 结论

通过改变 T 型网络中各个参数值,利用 Matlab 进行多次仿真计算各个参数的变化对被试品电容量和介损值的影响,得出以下结论:

1)随着木质架构对地杂散电阻 R 的增大,实测介损值由被试品初始介损值先减小至负值后增大变为正值,且最终值介于被试品初始值介损值和杂散电容介损值之间。测试电容量由被试品初始电容量值一直增大,最终值接近被试品和杂散电容 C_1 、 C_2 串联后的并联值;

2)随着被试品上端对木质架构的杂散电容 C_1 的值的增大,实测介损值由被试品初始介损值先减小至负值后增大为正值,电容量由被试品初始电容量值一直增大,最大值接近被试品和杂散电容 C_1 、 C_2 串联后的并联值;

3)随着被试品上端对木质架构的杂散电阻 R_1 的值增大,实测介损值分两种情况,一是由介损值(略大于被试品初始值)先缓慢增大后减小至负值;二是先缓慢减小,后快速减小至负值。电容量由被试品电容量与杂散电容 C_2 之和一直降低至略大于被试品电容量。

4.2 建议

1)随着木质架构对地杂散电阻 R 值的增大,对被试品电容量和介损的影响越来越大,在现场试验时,建议将木质架构非与被试品接触表面采用铝箔覆盖,保证接触良好、无缝隙后直接接地,使杂散电阻 R 值为零。

2)随着被试品对木质架构的杂散电容 C_1 或 C_2 值的增大,对被试品介损的影响先增大后减小,对被试品电容量影响越来越大,在现场试验时,建议被试

品远离周边木质架构,以减小杂散电容的影响。

3)随着被试品对木质架构的杂散电阻 R_1 或 R_2 值增大,对被试品介损值和电容量影响程度相反。现场测试时, R_1 或 R_2 值较大,且不易调整。

综上所述,在现场对被试品进行介质损耗试验时,应首先将被试品远离周边木制品(脚手架、梯子、包装箱、垫板等)和半绝缘状态的墙壁或地面,如无法远离上述物体,应将上述物体采用铝箔覆盖后直接接地,以减小对被试品电容量和介损值的影响。

参考文献

- [1] 覃汉敏. 测量 LCWD2-110 型互感器和电容式套管介损时出现负值原因的分析[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 144-147.
QIN Hanmin. Why do negative readings appear when measuring the dielectric loss of the potential transformer and the capacitive bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 144-147.
- [2] 申积良, 黄福勇, 周卫华, 等. 高压变压器油/气套管现场介质损耗试验方法讨论[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 71-73.
SHEN Jiliang, HUANG Fuyong, ZHOU Weihua, et al. New dielectric test method for oil/gas insulated high voltage bushing of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 71-73.
- [3] 彭翔, 陈禾, 夏谷林, 等. 500 kV 断路器并联电容器的现场高电压介损测量[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2378-2384.
PENG Xiang, CHEN He, XIA Gulin, et al. On-site dielectric loss measurements of 500 kV circuit-breaker capacitors under high voltage[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2378-2384.
- [4] 卢学容, 刘胜波, 阳林, 等. 湿热和污秽环境下 180 kV 油纸电容式套管介损特性试验[J]. 广东电力, 2018, 31(5): 115-120.
LU Xuerong, LIU Shengbo, YANG Lin, et al. Test on characteristic of dielectric loss of 180 kV oil-paper capacitor bushing under damp-heat and filthy environment[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(5): 115-120.
- [5] 苏煜, 张燕涛, 王薇. 空间干扰对电容式套管介损损耗因数 ($\tan\delta$) 测量结果影响的分析[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 87-90.
SU Yu, ZHANG Yantao, WANG Wei. Analysis on the effect of space disturbance upon capacitive bushing dielectric loss factor ($\tan\delta$) measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 87-90.
- [6] 闫立秋, 孔令明, 李立生. SF₆ 开关均压电容器介损测量时的强电场干扰及消除方法[J]. 山东电力技术, 2004(5): 60-61.
YAN Liqiu, KONG Lingming, LI Lisheng. SF₆ switch average potential capacitor's strong electric field interference and eliminating methods at dielectric loss measuring[J]. Shandong Electric Power, 2004(5): 60-61.
- [7] 黄涛, 刘艳, 李国伟. 变频介损仪在 CVT 不拆线试验中的应用[J]. 高电压技术, 2004, 30(7): 55-57.
HUANG Tao, LIU Yan, LI Guowei. The use of the frequency-conversion bridge in test of the capacitor voltage transformer without disconnecting the wire[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7): 55-57.
- [8] 董明, 刘阳, 杨凯歌, 等. 基于故障树理论的电容型套管故障模拟与辨识[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(6): 1-9.
DONG Ming, LIU Yang, YANG Kaige, et al. Fault simulation and identification of the capacitive bushing based on fault tree theory[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 1-9.
- [9] 陈安明, 杨洋, 黄文龙, 等. 变压器油纸电容式套管介损试验及分析[J]. 绝缘材料, 2013(3): 80-82.
CHEN Anming, YANG Yang, HUANG Wenlong, et al. Dielectric loss test and analysis of transformer oil paper capacitive bushing[J]. Insulating Materials, 2013(3): 80-82.
- [10] 高燃, 胡武炎, 吴胜, 等. 一起 500 kV 断路器用均压电容器缺陷的综合分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(5): 66-69.
GAO Ran, HU Wuyan, WU Sheng, et al. Comprehensive analysis on defects of grading capacitor for 500 kV circuit breaker[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(5): 66-69.
- [11] 付彦霖. 110 kV 带抽头电容式电压互感器介损损耗角正切 $\tan\delta$ 测试误差原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(2): 56-58.
FU Yanlin. Analysis on the causes of testing error for dielectric loss angle $\tan\delta$ of 110 kV tapped capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(2): 56-58.
- [12] 李岩, 刘一帆, 齐磊杰, 等. 高压电缆皱纹护套损耗系数改进计算方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 49-57.
LI Yan, LIU Yifan, QI Leijie, et al. An improved calculation method for high voltage cable corrugated sheath loss coefficient[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 49-57.
- [13] 李淑臻. 浅谈消除介损损耗因数测量误差的几种方法[J]. 中国水能及电气化, 2007(9): 48-50.
LI Shuzhen. Some method on eliminating the error of medium wasting factor measurement[J]. China Water Power & Electrification, 2007(9): 48-50.
- [14] 周妹末, 杨小涛, 唐林凯, 等. 一起末屏表面潮气对 220 kV 主变套管介损损耗测量的影响案例分析[J]. 绝缘材料, 2020, 53(9): 75-80.

- ZHOU Meimo, YANG Xiaotao, TANG Linkai, et al. Case analysis on influence of end shield surface moisture on dielectric loss measurement of 220 kV main transformer bushing[J]. Insulating Materials, 2020, 53(9): 75-80.
- [15] 钢板钻: JB T 11447—2013 [S]. 2013.
Core drill: JB T 11447—2013 [S]. 2013.
- [16] 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准: GB 50150—2016 [S]. 2016.
Standard for hand-over test of electric equipment electric equipment installation engineering: GB 50150—2016 [S]. 2016.
- [17] 韩宝银, 孙东明, 魏剑娜. 强电场干扰下开关均压电容器 $\tan\delta$ 及 C_x 测量方法研究[J]. 高电压技术, 1999, 25(4): 91-92.
HAN Baoyin, SUN Dongming, WEI Jianna. Study on measurement of $\tan\delta$ and C_x of grading capacitor under strong interference[J]. High Voltage Apparatus, 1999, 25(4): 91-92.
- [18] 李辉, 姚龙泉. 电容式电压互感器负介损值现象分析与解决措施[J]. 四川电力技术, 2010, 33(3): 84-86.
LI Hui, YAO Longquan. Analysis on negative value phenomenon of dielectric loss of capacitor voltage transformer and its solution[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2010, 33(3): 84-86.
- [19] 赵坚. 变压器绕组介损及电容异常分析[J]. 广西电力, 2010, 33(1): 14-17.
ZHAO Jian. Analysis of abnormal dielectric loss and capacitor of transformer winding[J]. Guangxi Electric Power, 2010, 33(1): 14-17.
- [20] 王红斌, 陈忠东, 林春耀. 绕组结构对介质损耗测量的影响分析[J]. 广东电力, 2006, 19(7): 8-10.
WANG Hongbin, CHEN Zhongdong, LIN Chunyao. Effect of windings on dissipation factor measurement[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(7): 8-10.
- [21] 陈江, 张立松, 谭龙胜, 等. 一种高鲁棒性雷击干扰与故障识别方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2): 10-15.
CHEN Jiang, ZHANG Lisong, TAN Longsheng, et al. Research on a highly robust lightning disturbance and fault identification method[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 10-15.
- [22] 陈志高. 介质损耗因数出现负值原因分析[J]. 广西电力, 2012, 35(6): 66-69.
CHEN Zhigao. Analysis of negative value of dielectric loss factor[J]. Guangxi Electric Power, 2012, 35(6): 66-69.
- [23] 王子凯, 张伟明. 电压互感器介质损耗角($\tan\delta$)负值问题的研究[J]. 电气技术, 2008(7): 102-103.
WANG Zikai, ZHANG Weiming. Research on negative values of dielectric loss in voltage transformers[J]. Electrical Engineering, 2008(7): 102-103.
- [24] 王志强, 宋新新, 常英贤, 等. 数据驱动下具备高抗干扰能力的输电线路故障检测技术[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 80-87.
WANG Zhiqiang, SONG Xinxin, CHANG Yingxian, et al. The data driven fault detection technology of transmission lines with high anti-interference ability[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 80-87.
- [25] 吴昊, 赵来军. 一起 CVT 电容分压器介损测试结果小于零的原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014(2): 82-86.
WU Hao, ZHAO Laijun. Analysis on less than zero of dielectric loss test result for capacitor divider in CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014(2): 82-86.
- [26] 聂海全, 关晓. 介损测量的基本原理及小介损电容的测量方法[J]. 电气技术与经济, 2013(6): 21-25.
NIE Haiquan, GUAN Xiao. The basic principle of dielectric loss measurement and the measurement method of small dielectric loss capacitance[J]. Electrical Equipment and Economy, 2013(6): 21-25.
- [27] 陈天翔, 王寅仲. 电气试验[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [28] 济南泛华科技有限公司. AI-6000K 自动精密电桥使用说明书[Z]. 济南: 济南泛华电子科技有限公司, 2015.
- [29] 赵沛, 张源斌. 介质损耗的数字化测量方法[J]. 高压电器, 2004, 40(1): 45-47.
ZHAO Pei, ZHANG Yuanbin. The digitized measurement method of dielectric loss[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(1): 45-47.

作者简介:

李永昆(1991—), 男, 工程师, 主要从事高电压与绝缘技术、高压试验工作。E-mail: 401330922@qq.com。

赵胜男(1989—), 女, 高级工程师, 主要从事高电压与绝缘技术、高压试验工作。

常莉敏(1992—), 女, 工程师, 主要从事超/特高压继电保护、故障诊断分析工作。

王笑宇(1993—), 女, 工程师, 主要从事高电压与绝缘技术、高压试验工作。

杨明(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事超/特高压高压试验、故障诊断分析工作。

徐静(1995—), 女, 高级工程师, 主要从事高电压与绝缘技术、高压试验工作。