

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.031

基于最小二乘法的MOA表面污秽干扰误差修正方法研究

任明辉¹, 王新龙¹, 杨可², 付银仓³

(1. 宝鸡供电局, 陕西 宝鸡 721004; 2. 渭南供电局, 陕西 渭南 714000;
3. 陕西磐隆电器工业设备集团有限公司, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了消除MOA表面污秽导致绝缘在线监测系统介质损耗角测量值产生的误差,文中用盐雾法对避雷器进行人工污秽试验,通过试验数据研究表面污秽程度与介质损耗角测量误差之间的关系,得出基于最小二乘法的介质损耗角修正方法。采用该方法可根据避雷器的污秽程度(等值盐密值),得出介质损耗角修正值,使修正后的测量值更接近真实值。实验室试验结果表明,该方法对于表面污秽产生的测量误差,具有良好的抑制效果,显著提高了介质损耗角的测量精度。

关键词: 氧化锌避雷器; 表面污秽; 等值盐密值; 最小二乘法

Study of the Modified Method of Interference Error Caused by MOA Surface Contamination Based on Least Square Method

REN Minghui¹, WANG Xinlong¹, YANG Ke², FU Yincang³

(1. Baoji Electric Power Supply Bureau, Shaanxi Baoji 721004, China; 2. Weinan Electric Power Supply Bureau, Shaanxi Weinan 714000, China; 3. Shaanxi Panlong Electric Industrial Equipment Group Co., Ltd., Shaanxi Yangling 712100, China)

Abstract: In order to eliminate the effect of MOA surface contamination on measured dielectric loss angle, the salt mist artificial pollution test is presented, by which the relation between surface contamination degree and dielectric loss angle measurement error can be investigated. By this functional relation, the dielectric loss angle modification method based on least square method is gained, and the modified value of dielectric loss angle can be gotten. The measured value by modified method is closer to the true value. This method is testified to have advantage of high precision for measuring dielectric loss angle and to have good effect on eliminating measurement error which is imposed by surface contamination through experiment in laboratory.

Key words: metal oxide arrester; surface contamination; salt deposit density(SDD); least square method

0 引言

MOA避雷器大多是在露天运行,由于工业的快速发展导致空气污染加重,加上风沙尘土多的因素,污秽问题显得较为突出。当湿度较大,尤其是雨天,绝缘子表面的污秽泄漏电流值将增大到微安级,直到毫安级,这一电流是有功电流,与MOA避雷器的阻性电流是同相的,无法消除,反映到监测值阻性电流占总泄漏电流的比例显著增大,影响避雷器介质损耗角的测量值,造成避雷器绝缘状态误判。对于这种干预因素目前常采用的方法是在避雷器瓷套底部表面安装屏蔽回流环使得沿面电流不经过避雷器底

座直接接地。这种方法虽然可以屏蔽掉避雷器泄漏电流中的表面泄漏电流。但同时也就不能对表面的污秽情况进行监测了,如果表面的污秽严重同样会影响避雷器的运行状态的,因此该方法具有局限性。

文中将用盐雾法对避雷器进行人工污秽试验,通过试验数据来研究表面污秽程度与介质损耗角测量误差之间的关系,得出基于最小二乘法的介质损耗角修正方法,来消除表面污秽对介质损耗角测量的影响。

1 表面污秽对介质损耗角测量的影响

在MOA表面存在污秽时,其等效电路可以看作是是非线性电阻旁并联了一个分流电阻(表面污层电阻),此时在避雷器的接地下引线上测得的泄漏

电流将包含有避雷器表面因污层电阻产生的沿面泄漏电流, 使得 MOA 阀片的泄漏电流的测量受到影响, 见图 1。当避雷器表面干净时, 避雷器底部总泄漏电流 $I_x = I_c + I_r$, 介质损耗角见图 1(b) 中的 δ 。当避雷器表面有污秽物时, 相当于在避雷器等效电路的非线性电阻旁并联了一个分流电阻 R_b , 并且给避雷器底部总泄漏电流相当于增加了一个阻性电流 I_b , 则此时避雷器底部总泄漏电流 $I'_x = I_c + I_r = I_c + I_r + I_b$, 向量图见图 1(b), 则此时的介质损耗角为 δ' 。由向量图可以看出, 表面污秽使得避雷器绝缘在线监测系统测量的介质损耗角增大了, 因此有必要研究避雷器表面污秽程度对介质损耗角测量值的影响情况。

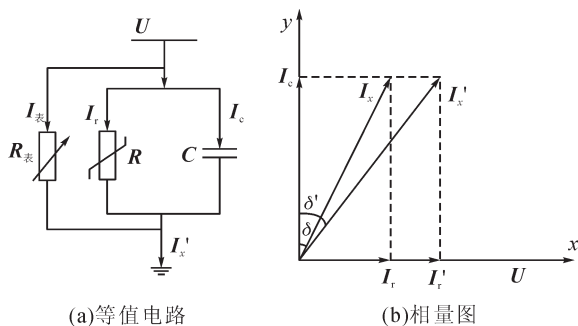


图 1 表面污秽 MOA 的等值电路

Fig. 1 The model of pollution MOA

2 盐雾法污秽试验研究

随着城市人口的集中和工业的发展, 乡镇企业和交通运输业的兴旺, 以及生态环境所产生的污染, 由于空气的水平运动可将某一地区的污秽输送到另一地区。于是, 弥漫在空气中的污染物日积月累地沉积在运行中的避雷器表面上, 形成了污秽层。按照污源特征可分为工业污秽和自然污秽两大类^[1]。工业型污秽是在工业生产过程中产生的污染物质, 大多数是由工厂烟囱排出的气相、液相和固相污物。自然型污秽是在自然条件下产生的污秽, 可分为尘土污秽、盐碱污秽、海水盐雾和鸟粪污秽。

2.1 表面污秽的表征

为使高压输电线路和电力设备在污秽地区可靠运行, 除对污湿特征和影响程度进行定性划分以外, 研究表征污秽避雷器运行状态的特征量(或称污秽参数)也很重要。根据这些特征量就可确定避雷器的污秽程度, 定量划分污秽水平, 为输电线路设计和运行维护提供参考依据。随着运行经验的积累和科学测试手段的日益进步, 研究人员对定量划分污秽水平的方法进行了大量的研究, 提出了多种污秽参数的表征方法^[1-8], 其中最常用的是等值盐密。

等值盐密是避雷器表面每平方厘米面积上附

着的污秽中导电物质含量相当的氯化钠数(mg/cm^2)。它只与避雷器的污秽量、成分和性质有关, 虽然只反映污秽的静态参数, 不能反映避雷器的运行状态, 但测量等值盐密比较直观、简单, 不受电压、试验设备容量和试验场地的限制, 也能较好地表征避雷器表面的污秽程度, 且测量时不需要高压电源, 因此被许多国家采用。等值盐密是衡量污秽程度的一种间接而简便、直观的静态参数。

2.2 盐雾法污秽试验

GB/T 4585—2004《交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验》中有以下两种人工污秽试验方法: 其一是盐雾法, 使用此法时绝缘子遭受到不确定的环境污染; 其二是固体层法, 使用此法时在绝缘子表面上覆盖有一规定的固体污秽物, 覆盖层相当均匀。文中采用盐雾法进行人工污秽试验。该人工污秽试验方法适合架空线路、变电站、牵引线路绝缘子、套管以及避雷器的人工污秽试验。

GB/T 16434—1996《高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准》规定将线路设备的污秽等级共划分为 0、I、II、III、IV 5 级, 发电厂、变电所设备的污秽等级共划分为 I、II、III、IV 4 级。线路和发电厂、变电所设备外绝缘各污秽等级和对应的盐密按表 1 规定划分。

根据以上污秽等级取出 18 个盐密值进行试验, 分别为 0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06、0.07、0.09、0.11、0.13、0.15、0.17、0.19、0.21、0.23、0.25、0.27、0.29 mg/cm^2 。

根据 20 $^{\circ}\text{C}$ 时等值盐密

$$SDD = S_a \cdot V / A \quad (1)$$

由式(1)可以得

$$S_a = SDD \cdot A / V \quad (2)$$

式(1)、(2)中: S_a 为盐度, kg/m^3 ; V 为溶液体积, cm^3 ; A 为清洗表面的面积, cm^2 。

试验用避雷器表面积为 10 946 cm^2 , 配制盐溶液为 30 cm^3 , 由式(2)可以算出对应的盐度 S_a 为: 3.65、7.3、10.95、14.59、18.24、21.89、25.54、32.84、40.14、47.43、54.73、62.03、69.32、76.62、83.92、91.22、98.51、105.81 kg/m^3 。

在 20 $^{\circ}\text{C}$ 下配制相应盐度的盐溶液进行试验时, 用 MOA 绝缘在线监测系统采集记录数据, 并对其分析处理, 对于数据与预期反差较大的点重新进行试验, 这样不仅可以保证整个试验数据的完整性, 同时也可以确保试验的高效性。整个试验过程中在线监测系统采集到的有效数据——介质损耗角 δ 值、表面泄漏电流、体泄漏电流、试验电压等信息均

表1 线路和发电厂、变电所污秽等级

Table 1 Pollution classes of high voltage transmission line, power plant and substation

污秽等级	污湿特征	盐密/($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	
		线路	发电厂、变电所
0	大气清洁地区及离海岸盐场 50 km 以上无明显污染地区。	≤ 0.03	—
I	大气轻度污染地区,工业区和人口低密集区,离海岸盐场 10~50 km 地区。在污闪季节中干燥少雾(含毛毛雨)或雨量较多时。	$>0.03 \sim 0.06$	≤ 0.06
II	大气中等污染地区,轻盐碱和炉烟污秽地区,离海岸盐场 3~10 km 地区,在污闪季节中潮湿多雾(含毛毛雨)但雨量较少时。	$>0.06 \sim 0.10$	$>0.06 \sim 0.10$
III	大气污染较严重地区,重雾和重盐碱地区,近海岸盐场 1~3 km 地区,工业与人口密度较大地区,离化学污染源和炉烟污秽 300~1 500 m 的较严重污秽地区。	$>0.10 \sim 0.25$	$>0.10 \sim 0.25$
IV	大气特别严重污染地区,离海岸盐场 1 km 以内,离化学污染源和炉烟污秽 300 m 以内的地区。	$>0.25 \sim 0.35$	$>0.25 \sim 0.35$

存储于应用软件的数据库中,为后续的研究分析奠定基础。为了保证试验的有效性,每次试验完毕,用自来水对试品避雷器表面进行彻底的清洗,以除去污秽物的所有痕迹。

2.3 盐雾法试验结果

文中进行的 18 组盐雾法试验,基本都是在同一个时间段,温度、湿度以及电压波动和谐波含量相同的条件下进行,已经最大限度地消除了其他外界条件对该试验精确度的影响。并且各个盐度的试验都重复做了 3 次,取其平均值,这样更好地提高了试验精度。试验数据记录见表 2。

表2 盐雾法试验数据记录

Table 2 Salt mist experiment data recording

表面等值盐密/($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	盐度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	介损角测量值 δ/rad	介损角校正 $\Delta\delta/\text{rad}$
0.01	3.65	0.058 937	-0.006 963
0.02	7.30	0.059 460	-0.007 486
0.03	10.95	0.060 228	-0.008 254
0.04	14.59	0.061 414	-0.009 440
0.05	18.24	0.061 204	-0.009 230
0.06	21.89	0.061 361	-0.009 387
0.07	25.54	0.063 158	-0.011 184
0.09	32.84	0.061 693	-0.009 719
0.11	40.14	0.062 112	-0.010 138
0.13	47.43	0.065 949	-0.013 975
0.15	54.73	0.068 950	-0.016 976
0.17	62.03	0.069 142	-0.017 168
0.19	69.32	0.071 078	-0.019 104
0.21	76.62	0.072 648	-0.020 674
0.23	83.92	0.073 834	-0.021 860
0.25	91.22	0.074 061	-0.022 087
0.27	98.51	0.076 904	-0.024 930
0.29	105.81	0.077 236	-0.025 262

由表 2 可以看出,表面污秽程度对介质损耗角测量值的影响,盐度越大,测量的介质损耗角误差越大,而且呈现一定的变化趋势。因此,文中将引入最小二乘法研究避雷器表面污秽程度和介质损耗角误差修正值之间的关系,建立基于最小二乘法的介质损耗角修正模型,进而对 MOA 绝缘在线监测系统测量的介质损耗角进行校正,以达到提高在线监测系统精度的目的。

3 最小二乘法引入

在科学研究和实际工作中,常常会遇到这样的问题:给定两个变量 x 、 y 的 m 组实验数据 (x_1, y_1) , $(x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)$, 如何从中找出这两个变量间的函数关系的近似解析表达式(也称为经验公式),以便定量地表达两者之间的关系。依据对问题所作的分析,通过数学建模或者通过整理归纳实验数据,能够判定出 x 与 y 之间满足或大体上满足某种类型的函数关系式 $y=f(x, a)$, 其中 $a=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 是 n 个待定的参数,这些参数的值可以通过 m 组实验数据来确定(一般要求 $m>n$)。通过使拟合函数在 x_i 处的值与实验数值的偏差平方和最小,这种在方差意义下对实验数据实现最佳拟合的方法称为“最小二乘法”, $a_1, a_2, \dots, a_n$ 称为最小二乘解, $y=f(x, a)$ 称为拟合函数^[9]。

曲线拟合又称函数逼近,在做函数逼近时,要求近似函数尽可能反映给定数据点的基本趋势,在某种意义上与函数最“逼近”。在做函数逼近时,衡量近似函数好坏的标准是残差的大小。按照残差平方和最小 $\left(\sum_i \delta_i^2 = \min \right)$ 的准则确定参数,求得近似函数的方法称为最佳平方逼近,也称曲线拟合(或数据

拟合)的最小二乘法。它的计算比较简便,是实践中常用的一种函数逼近方法^[10-13]。

根据给定的离散数据,通常称为结点 (x_i, y_i) 其中 $i=1, 2, \dots, n$,构造逼近函数 $y=f(x)$,绘制函数拟合曲线。在结点处曲线上对应点的 y 坐标值 $f(x_i)$ 与相应的实验数值 y_i 的差 $\delta_i=y_i-f(x_i)$ 称为残差,最小二乘法就是要使残差的平方和最小,即 $\sum_{i=1}^n \delta_i^2$ 为最小。在用最小二乘法拟合函数时,构造的函数 $f(x)$ 称为这组数据的最小二乘函数,通常取 $f(x)$ 为一些较简单的函数的集合,如低次多项式,指数函数等,文中根据试验数据趋势选择多项式作为逼近函数。选择代数多项式作为逼近函数时,用最小二乘法构造逼近函数的方法如下:

设已知结点 $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$,用 $m(<n)$ 次多项式(3)来近似它。

$$f_m(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+\dots+a_nx^m. \quad (3)$$

应该选择恰当系数 $a_0, a_1, \dots, a_n$ 使得 $f_m(x)$ 能较好地近似列表函数 $y(x)$,要满足平方逼近条件,应使式(4)取最小值。

$$S(a_0, a_1, \dots, a_n)=\sum_{i=0}^n [y(x_i)-f_m(x_i)]^2. \quad (4)$$

式(4)中, S 为非负的关于 $a_0, a_1, \dots, a_n$ 的二次多项式,它必有最小值,根据 S 取极值的条件,求出 $a_0, a_1, \dots, a_n$,就构造出满足平方逼近条件的函数

$$f_m(x)=a_0+a_1x+\dots+a_nx^m. \quad (5)$$

最小二乘法构造的逼近函数,由于全面而不是孤立地考虑各结点的影响,因此比较符合实际情况,文中采用最小二乘法的多项式拟合。

4 基于最小二乘法的介质损耗角误差修正方法

4.1 误差修正模型的获取

上文提到最小二乘法就是解决如何找出这两个变量间的函数关系,以便定量的表达两者之间的关系的一种函数逼近方法。为了研究表面污秽程度和介质损耗角修正值之间的关系,用最小二乘法拟合附盐密度,盐度与介质损耗角修正值 $\Delta\delta$ 之间的关系。

现就针对避雷器表面污秽程度对氧化锌避雷器绝缘在线监测系统测量介质损耗角的影响,用最小二乘法进行修正曲线拟合,得到基于最小二乘法的表面污秽干扰误差修正模型^[14-18]。

根据表2中的试验数据,用最小二乘法拟合盐度和介质损耗角修正值 $\Delta\delta$ 的关系曲线。经过多次试验比较后,发现四阶多项式 $y=a_1x^4+a_2x^3+a_3x^2+a_4x+$

a_5 的拟合曲线效果比较理想。因此,选用四阶多项式来拟合盐度和介质损耗角修正值之间的关系曲线,其多项式系数为 $a=[0.000\ 000\ 000\ 192\ 39\ -0.000\ 000\ 022\ 918\ 91\ -0.000\ 000\ 530\ 798\ 13\ -0.000\ 085\ 167\ 867\ 45\ -0.007\ 102\ 599\ 367\ 28]$,其拟合曲线见图2。

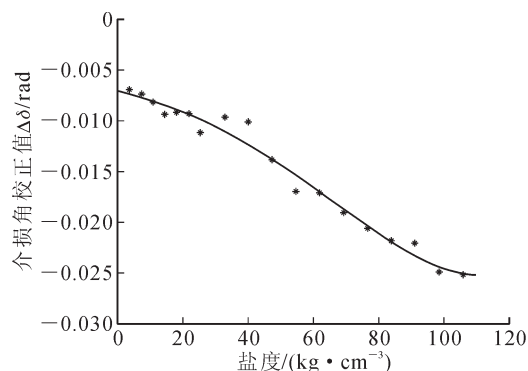


图2 盐度和 $\Delta\delta$ 拟合曲线

Fig. 2 Salinity and $\Delta\delta$ fitting curve

用最小二乘法(四阶多项式)拟合附盐密度和介质损耗角修正值 $\Delta\delta$ 的关系曲线,其多项式系数为: $a=[3.406\ 813\ 865\ 648\ 81\ -1.111\ 654\ 579\ 332\ 03\ -0.070\ 934\ 909\ 870\ 54\ -0.031\ 060\ 235\ 074\ 86\ -0.007\ 102\ 740\ 333\ 35]$,其拟合曲线见图3。

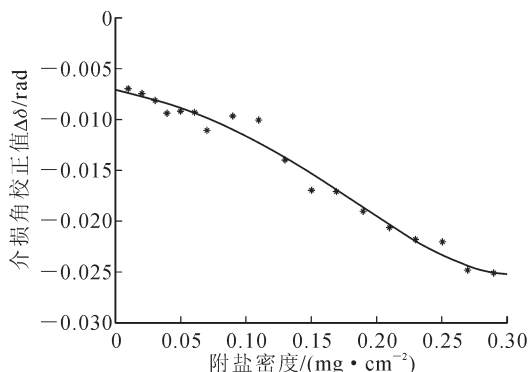


图3 附盐密度和 $\Delta\delta$ 拟合曲线

Fig. 3 Salt deposit density and $\Delta\delta$ fitting curve

由图2、3可以得出,只要给定附盐密度(等值盐密)就可以根据最小二乘法拟合的介质损耗角修正模型,得出它相对应的修正值 $\Delta\delta$,进而对绝缘在线监测系统测量的介质损耗角进行修正,从而得到介质损耗角的真实值。

4.2 误差修正模型的仿真研究

对基于最小二乘法的表面污秽干扰的误差修正模型,进行仿真分析,校验其修正效果,看其修正模型误差是否达到理想的范围。仿真结果见表3。

由表3可以看出,由基于最小二乘法的介质损耗角修正模型得出的介质损耗角修正值 $\Delta\delta$ 和实测值的误差非常的小,误差在 2.2×10^{-3} 以下,且其平方

表3 仿真结果比较

Table 3 Result comparison of simulation date

等值盐密/ ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	盐度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\Delta\delta$ 实测 值/rad	$\Delta\delta$ 计算 值/rad	差值/rad
0.01	3.65	-0.006 963	-0.007 42	-0.000 459
0.02	7.30	-0.007 486	-0.007 76	-0.000 275
0.03	10.95	-0.008 254	-0.008 13	0.000 128
0.04	14.59	-0.009 440	-0.008 52	0.000 919
0.05	18.24	-0.009 230	-0.008 95	0.000 280
0.06	21.89	-0.009 387	-0.009 42	-0.000 030
0.07	25.54	-0.011 184	-0.009 92	0.001 260
0.09	32.84	-0.009 719	-0.011 06	-0.001 341
0.11	40.14	-0.010 138	-0.012 36	-0.002 221
0.13	47.43	-0.013 975	-0.013 81	0.000 167
0.15	54.73	-0.016 976	-0.015 39	0.001 591
0.17	62.03	-0.017 168	-0.017 05	0.000 118
0.19	69.32	-0.019 104	-0.018 75	0.000 355
0.21	76.62	-0.020 674	-0.020 42	0.000 251
0.23	83.92	-0.021 860	-0.021 99	-0.000 131
0.25	91.22	-0.022 087	-0.023 36	-0.001 277
0.27	98.51	-0.024 930	-0.024 44	0.000 495
0.29	105.81	-0.025 262	-0.025 09	0.000 170

和误差为 $SSE=1.423\times 10^{-5}$, 已经达到了该误差修正系统的误差要求。

4.3 基于最小二乘法的表面污秽干扰误差修正方法

基于最小二乘法的介质损耗角修正模型,即引入最小二乘法对避雷器表面污秽程度和介质损耗角的修正值之间的关系进行函数拟合。由拟合的函数关系得出基于最小二乘法的表面污秽干扰修正值,对在线监测系统测量的避雷器的介质损耗角进行修正,使其修正为真实值。构建的基于最小二乘法的表面污秽干扰修正系统,见图4。

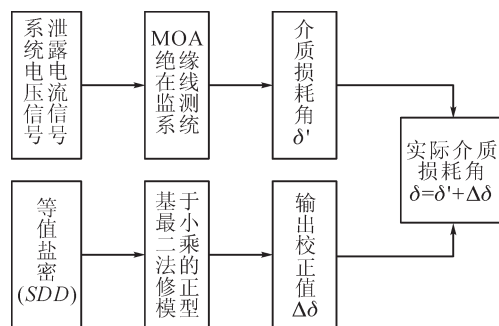


图4 基于最小二乘法的介质损耗角修正系统框图

Fig. 4 Adjusting dielectric loss angle system diagram based on least square method

由图4可以看出,只要知道避雷器的污秽程度(即等值盐密值),就可以通过基于最小二乘法的介质损耗角修正模型,得出介质损耗角修正值 $\Delta\delta$;而

MOA 绝缘在线监测系统得出的介质损耗角为 δ' ,则实际的介质损耗角为 $\delta=\delta'+\Delta\delta$,且试验证明用该介质损耗角修正模型得出的修正值,修正后的介质损耗角和避雷器无污秽时测量值非常接近,从而消除了表面污秽对介质损耗角测量值的影响。

5 结语

文中研究了避雷器表面污秽情况对在线监测系统测量介质损耗角的影响,用盐雾法进行避雷器污秽试验研究,研究避雷器的表面污秽程度和测量的介质损耗角之间的关系,把试验记录的盐度和介质损耗角修正值之间的关系,转化为等值盐密和介质损耗角之间的关系,进而用最小二乘法拟合他们之间的函数关系,得出基于最小二乘法的介质损耗角修正模型。通过该介质损耗角修正模型,对在线监测系统测量的避雷器的介质损耗角进行修正,使其修正为真实值,从而抑制了表面污秽对避雷器介质损耗角测量的影响。

参考文献:

- [1] 顾乐观,孙才新. 电力系统的污秽绝缘[M]. 重庆:重庆大学出版社,1990.
GU Leguan,SUN Caixin. Contamination insulation of power system[M]. Chongqing: Chongqing University Press,1990.
- [2] 张仁豫. 绝缘污秽放电[M]. 北京:水利电力出版社,1994.
ZHANG Renyu. Contamination insulation discharging[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press,1994.
- [3] 霍万龙. 绝缘子污秽等级测量方法选择[J]. 东北电力技术,2002,23(3):23-25.
HUO Wanlong. Selection of measuring method for the pollution level of insulators[J]. Northeast Electric Power Technology,2002,23(3):23-25.
- [4] 钱茂华,崔国顺,关志成. 用局部表面电导率划分污秽等级[J]. 电瓷避雷器,1994(6):12-14.
QIAN Maohua,CUI Guoshun,GUAN Zhicheng. Conductivity of partial surface gradation for pollution contamination[J]. Insulators and Surge Arresters,1994(6):12-14.
- [5] 崔国顺. 高压绝缘子污秽度测量方法的研究[D]. 北京:清华大学,1994.
CUI Guoshun. Study on the measurement method of high voltage insulator contamination[D]. Beijing:Tsinghua University,1994.
- [6] 宿志一,杨源龙,刘革立,等. 我国农业地区的大气污染与输变电设备污秽等级的划分[J]. 中国电力,1997,30(12):3-6.
SU Zhiyi,YANG Yuanlong,LIU Geli,et al. Atmospheric pollution impacting transmission and substation equipment in China rural regions and its classification[J]. China Electric

- Power, 1997, 30(12):3-6.
- [7] 周建国, 肖 嵘, 张 宇, 等. 三峡送上海直流 500 kV 换流站外绝缘污秽水平的研究[J]. 华东电力, 2001(12):11-13.
ZHOU Jianguo, XIAO Rong, ZHANG Yu, et al. A study on pollution level of external Insulation in Three Gorge-Shanghai 500 kV DC converter station[J]. East China Electric Power, 2001(12):11-13.
- [8] 宿志一. 用饱和盐密确定污秽等级及绘制污区分布图的探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(8):16-19.
SU Zhiyi. Study on defining pollution classes and mapping pollution areas by saturated equal salt deposit density[J]. Power System Technology, 2004, 28(8):16-19.
- [9] 李建良, 蒋 勇, 汪光先. 计算机数值方法[M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.
LI Jianliang, JIANG Yong, WANG Guangxian. Computer numerical method[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2000.
- [10] 刘春玲. 发动机负荷特性曲线研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
LIU Chunling. Study on load characteristic curve of engine[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [11] 徐志钮, 律方成, 赵丽娟, 等. 基于加汉宁窗插值的金属氧化物避雷器改进容性电流补偿法[J]. 高压电器, 2006, 42(6):453-455.
XU Zhiniu, LYU Fangcheng, ZHAO Lijuan, et al. Modified capacitive current compensation method of MOA based on Hanning-windowed interpolation[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6):453-455.
- [12] 王昌长, 李福祺, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
WANG Changchang, LI Fuqi, GAO Shengyou. On line monitoring and fault diagnosis for power equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [13] 吕延锋, 钟连宏. 介损测量技术及其最新发展[J]. 高压工程技术, 1996, 22(2):53-55.
LYU Yanfeng, ZHONG Lianhong. Dielectric loss measurement and its new development[J]. High Voltage Engineering, 1996, 22(2):53-55.
- [14] 李 峰. 永昌电厂金属氧化物避雷器绝缘在线监测系统的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
LI Feng. Application research of on-line monitoring system for metal oxide surge arrester in Yongchang power plant[D]. Chongqing: Chongqing University, 2001.
- [15] 周 斌. 一种金属氧化物避雷器在线监测技术的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
ZHOU Bin. Study on on-line monitoring technology of metal oxide surge arrester[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [16] PAUL D, VENUGOPALAN S I. Low-resistance grounding method for medium voltage power system[C]//IEEE Industry Application Society Annual Meeting. USA: IEEE, 1991: 1571-1578.
- [17] BOSWORTH T, SETFORD S, HEYWOOD R, et al. Pulsed amperometric detection of furan compounds in transformer oil[J]. Analytica Chimica Acta, 2001, 450(1/2):253-261.
- [18] ZHAO T, LI Q M, QIAN J L. Investigation on digital algorithm for on-line monitoring and diagnostics of metal oxide surge arrester based on an accurate model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2):751-756.
- 任明辉(1981—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电力系统运行管理工作。
- 付银仓(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事变压器研发及技术管理工作。

(上接第 193 页)

- 研制[J]. 高压电器, 2004, 40(2):104-106.
DAI Huaizhi, LYU Yihang, JIA Shenli, et al. Design of on-line monitoring system for circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2):104-106.
- [18] 孟永鹏, 贾申利, 荣命哲. 真空断路器机械特性的在线监测方法[J]. 高压电器, 2006, 42(1):31-34.
MENG Yongpeng, JIA Shenli, RONG Mingzhe. On-line monitoring method for mechanical characteristics of vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1):31-34.
- [19] LANG Fucheng, XU Jianyuan, LIN Xin. On-line monitoring technology for mechanical characteristics of vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator[C]//The 12th Asia Conference on Electrical Discharge (ACED-2004). [S. l.]: IEEE, 2004:314-317.
- [20] 张显聪, 喻冬梅, 杨 柳, 等. 位移传感器在中压断路器的应用研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7):37-41.
ZHANG Xiancong, YU Dongmei, YANG Liu, et al. The application study of the displacement sensor used for testing the mechanical properties of medium voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7):37-41.
- [21] 殷士波. 真空断路器机械特性在线监测仪[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.
YAN Shibo. On-line monitoring of mechanical characteristics for vacuum circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.
- 戴冬云(1982—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事智能开关设备的研发。
- 骆 虎(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事开关设备的研发和可靠性研究。